

Grado en Ingeniería Eléctrica
2018 – 2019

Trabajo Fin de Grado

“Modelo Jiles-Atherton de transformadores de intensidad”

Álvaro Fernández Ramos

Tutor/es

Juan Carlos Burgos Díaz

Leganés, 2 de Julio de 2019



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el apoyo y sacrificio que han hecho por mí a lo largo de mi carrera y redacción de este trabajo a las siguientes personas en especial:

- Mi padre. Un referente, un ejemplo y una persona importantísima para mí del que he aprendido infinidad de cosas que no nos enseñan en las escuelas. Me ha inculcado esa capacidad de superación, ayudándome a levantarme cuando ni yo tenía fuerzas, siendo un constante apoyo y una fuente de consejos que sin duda han ayudado para conseguir el sueño de mi vida. Gracias papá.
- Mi madre. Por ser un apoyo constante, por ser el hombro en el que llorar cuando ha habido algún fracaso, por ser la persona con la que primero comparto el éxito, por esa ilusión que desprende por cualquier cosa que se proponga, por enseñarme esos valores que hoy me definen, por ser uno de los pilares que sujetan mi vida. Gracias mamá.
- Mis hermanas. Aunque somos tan distintos en nuestra forma de ser, en realidad nos parecemos más de lo que creemos, sin ellas muchos de los momentos malos que he tenido a lo largo de estos años hubieran sido menos llevaderos, ya que me han hecho reír, me han hecho de rabiar, me han hecho enfadar incluso más de lo que estaba en ese momento, pero siempre, con el fin de hacerme olvidar el tema que me preocupaba. Gracias María y Marta.
- A ella. Sin duda hoy en día las cosas no son como hubiéramos querido que fueran por diferentes motivos, pero sin duda siempre has sido y serás un apoyo fundamental. Me has hecho levantarme en momentos en los que ni yo me creía que fuera capaz de hacerlo, siempre has sido una persona atenta conmigo, cualquier logro mío es como si fuera tuyo elevado a la millonésima parte. Siempre a mi lado entendiendo mi cabeza y mi forma de afrontar la vida. Sin duda, gracias Claudia.
- A mis profesores. Porque sin ellos, este trabajo sería inviable, porque gracias a ellos, hoy soy lo que soy. Con ellos he aprendido a fracasar y a levantarme, a no rendirme jamás porque en la vida, nada se regala, he aprendido a nunca darme por satisfecho, y buscar el porqué de todo lo que me rodea. Agradezco que me hayan enseñado, aunque sea de manera muy breve, el mundo de la ingeniería, sin duda, gracias a ellos hoy soy una persona distinta con más hambre de aprender si cabe. Hago especial énfasis en Juan Carlos Burgos Díaz, tutor de este TFG, por su paciencia conmigo y aportación de la sabiduría que le caracteriza para hacer las cosas lo mejor posible. También agradezco a David López Cortón por abrirme el mundo de las protecciones eléctricas, que, sin ello, en la vida me hubiera planteado hacer este TFG. Gracias.
- A mis amigos. Porque sin ellos, el día a día habría sido un aburrimiento, siempre han aportado su grano de arena, ayudándome cuando lo necesitaba, sin importar lo que les costase en esfuerzo, siempre han aguantado mis comidas de cabeza cuando suspendía o si salía descontento de un examen, siempre tendremos historias que contar gracias a los momentos vividos. Gracias Dani, Pablo, Tomás, Diego, Jorge y a mis niños de MGL.

También me gustaría hacer mención a la compañía SEL, que ha aportado los equipos para realizar el laboratorio de Protecciones eléctricas, a partir de lo cual ha surgido la necesidad para redactar este Trabajo Fin de Grado.

INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Interés del tema del presente documento.....	1
1.2 Objetivo del proyecto	1
1.3 Procedimiento para realizar el trabajo	2
2. TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD.....	3
2.1 Misión	3
2.2 Errores en los transformadores y sus causas.....	4
2.3 Transformadores de medida y protección – Circuito equivalente	5
2.3.1 Transformadores de medida	6
2.3.2 Transformadores de protección.....	7
2.4 Fenómenos a tener en cuenta en el modelado.....	8
2.4.1 Saturación	8
2.4.2 Comportamiento del T.I. en circuito abierto	9
2.4.3 Polaridad.....	9
2.4.4 Histéresis.....	9
2.3.5 Resistencias y reactancias	10
3. HERRAMIENTAS PARA EL MODELADO	12
3.1 Descripción de la herramienta Simulink®.....	12
3.2 Fases de la simulación.....	12
3.3 Biblioteca de bloques	12
3.4 Simulación de un modelo desde Simulink®	13
3.4.1 Opciones para la simulación (<i>Solver</i>).....	14
4. MODELO JILES-ATHERTON DE UN TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD	17
4.1 Teoría Jiles-Atherton de materiales ferromagnéticos	17
4.2 Modelo de Transformador de Intensidad desarrollado en <i>Simulink</i> ®.....	20
5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS MODELOS	24
5.1 Modelo Jiles-Atherton de materiales ferromagnéticos	24
5.1.1 Parámetros de entrada.....	24
5.1.2 Simulación principal.....	25
5.1.3 Simulación de lazos menores de histéresis	27
5.2 Modelo Jiles-Atherton de un transformador de intensidad	31
5.2.1 Parámetros de entrada.....	31
5.2.2 Simulación principal.....	32
5.2.3 Ensayo del transformador de intensidad ante cortocircuito en la red ..	34

5.3 Comparación con la bibliografía	38
6. CONCLUSIONES	40
6.1 Resumen	40
6.2 Conclusiones	40
6.3 Sugerencias y recomendaciones para trabajos futuros	41
7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	43
8. PRESUPUESTO E IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO.....	45
8.1 Presupuesto	45
8.2 Impacto socio-económico	45

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD [1].....	5
FIG. 2 REPRESENTACIÓN DE LA CURVA DE SATURACIÓN DE UN T.I. [2]	8
FIG. 3 EVOLUCIÓN DE DOMINIOS MAGNÉTICOS ANTE UN CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO [3].....	10
FIG. 4 CICLO DE HISTÉRESIS [4].....	10
FIG. 5 DIÁLOGO DEL MENÚ MODEL CONFIGURATION PARAMETERS.....	13
FIG. 6 SUBMENÚ SOLVER	14
FIG. 7 SELECCIÓN DEL TIEMPO DE MUESTREO FUNDAMENTAL	16
FIG. 8 SELECCIÓN DE LAS OPCIONES DE LAS TAREAS Y TIEMPOS DE MUESTREO	16
FIG. 9 SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE PASO DE INTEGRACIÓN Y TOLERANCIAS DEL SISTEMA.....	16
FIG. 10 MODELO JILES-ATHERTON EN SIMULINK®	19
FIG. 11 FUNCIÓN DE LANGEVIN PARA LA OBTENCIÓN DE COMPONENTE ANHISTERÉTICA DE MAGNETIZACIÓN	20
FIG. 12 MODELO JILES-ATHERTON DE UN TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD	22
FIG. 13 FORMAS DE ONDA DE H Y B	25
FIG. 14 FORMA DE ONDA DE LA MAGNETIZACIÓN, M	26
FIG. 15 CURVA B-H EN MODELO J-A	26
FIG. 16 LAZOS DE HISTÉRESIS PARA CAMPOS MAGNÉTICOS DE 5000 Y 1000 A-v/m	27
FIG. 17 FORMAS DE ONDA DE CAMPO MAGNÉTICO E INDUCCIÓN MAGNÉTICA PARA 5000 A-v/m Y 1000 A-v/m	27
FIG. 18 FORMA DE ONDA DE CAMPO MAGNÉTICO E INDUCCIÓN MAGNÉTICA CON ARMÓNICO FUNDAMENTAL Y 5º ARMÓNICO	28
FIG. 19 MODELO J-A PARA SIMULAR ARMÓNICOS	29
FIG. 20 CURVA DE HISTÉRESIS FUNDAMENTAL Y LAZOS MENORES.....	30
FIG. 21 CICLO DE HISTÉRESIS CON INFLUENCIA DE ARMÓNICOS PROPUESTOS Y CAMPO MAGNÉTICO QUE LO GENERA	30
FIG. 22 ENTRADA DE INTENSIDAD MULTIPLICADA POR EL NÚMERO DE ESPIRAS EN EL DEVANADO PRIMARIO	32
FIG. 23 FORMA DE ONDA DE CAMPO E INDUCCIÓN MAGNÉTICA EN EL NÚCLEO FERROMAGNÉTICO	33
FIG. 24 CURVA DE MAGNETIZACIÓN DEL T.I.	33
FIG. 25 INTENSIDAD SECUNDARIA	34
FIG. 26 INTENSIDAD DE ENTRADA POR LAS ESPIRAS DEL DEVANADO PRIMARIO EN ENSAYO DE CORTOCIRCUITO	35
FIG. 27 MODELO DE T.I. PARA ENSAYO DE CORTOCIRCUITO	36
FIG. 28 LAZO DE HISTÉRESIS DE UN T.I. EN CORTOCIRCUITO	37
FIG. 29 INTENSIDAD SECUNDARIA PARA ENSAYO DE CORTOCIRCUITO	38
FIG. 30 DIAGRAMA DE BLOQUES EN SIMULINK® PARA GENERAR CURVAS DE HISTÉRESIS USANDO EL MODELO JILES-ATHERTON [5]	39

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 PARÁMETROS DE ENTRADA MODELO J-A [5].....	24
TABLA 2 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE SIMULINK®	25
TABLA 3 AMPLITUD Y FRECUENCIA ANGULAR DEL ESTUDIO DE ARMÓNICOS	28
TABLA 4 PARÁMETROS NÚCLEO FERROMAGNÉTICO PARA T.I. [5].....	31
TABLA 5 PARÁMETROS INTERNOS DEL T.I.	31
TABLA 6: PRESUPUESTO DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO	45

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Interés del tema del presente documento

El origen de este proyecto es raíz de la idea de realizar un laboratorio de la asignatura Protecciones Eléctricas de la Universidad Carlos III a partir del curso 2019/2020, el cual contaría con un sistema protectorio de un transformador de potencia mediante relés diferenciales.

Tal y como cabe esperar, este documento pertenece a un proyecto mayor que abarca todo lo mencionado anteriormente. Debido a que el proyecto es demasiado extenso, se ha dividido el trabajo de esta manera:

- Inés Palka: Proyecto principal en el que se modelan la fuente y el transformador de potencia.
- Jorge Bernardo Ortega Martínez: Proyecto de ajuste y ensayo de relé de protección SEL 487-E.
- Álvaro Fernández Ramos: Modelado de los Transformadores de Intensidad para alimentar los relés diferenciales.

El proyecto en sí, se utilizará como guía para el laboratorio de Protecciones Eléctricas de la UC3M, por ello, esta parte del proyecto se va a enfocar de la manera más didáctica posible explicando cómo realizar un modelo de transformador de intensidad realizando un repaso de lo aprendido a lo largo de la carrera en cuanto a transformadores de intensidad y núcleos magnéticos se refiere.

En este documento, se va a modelar un transformador de intensidad de protección, para ello, se utilizará la teoría de Jiles-Atherton para materiales ferromagnéticos. Se ha realizado así debido a la similitud existente entre el núcleo de un transformador de intensidad y un material ferromagnético. El modelo basará su funcionamiento en las ecuaciones que definen el comportamiento del transformador de intensidad mientras que el núcleo magnético de mismo será implementado por el modelo Jiles-Atherton mencionado, mediante el cual se podrá obtener la curva de magnetización que caracteriza al transformador.

1.2 Objetivo del proyecto

El objetivo es realizar un estudio completo del modelo Jiles-Atherton de un material ferromagnético y aplicarlo en el modelo de un transformador de intensidad. Una vez se juntan ambos modelos, se obtendrá la curva de magnetización o lazo de histéresis que caracterizará la saturación del transformador de intensidad, además de la intensidad secundaria que alimentará los relés de protección.

Inicialmente, este trabajo estaba pensado para realizarlo mediante el software ATPDraw, pero en el momento de comenzar este Trabajo Fin de Grado el Departamento de Ingeniería Eléctrica no disponía de una licencia completa de dicho software, por lo que se ha decidido implementar los modelos en Simulink®. Esta decisión ha sido tomada de manera conjunta junto con el tutor de este proyecto D. Juan Carlos Burgos Díaz y el autor del presente documento. El motivo de esta elección ha sido, porque la manera de implementar ambos modelos en la herramienta es, dentro de su dificultad, bastante directa, gracias a lo cual, se podrán cubrir los plazos establecidos en fecha y forma.

1.3 Procedimiento para realizar el trabajo

Tal y como se ha comentado, el objetivo final es obtener el modelado de un transformador de intensidad mediante la teoría de Jiles-Atherton. En este apartado, se explicará cómo se va a realizar el estudio y el orden en el que se han realizado las tareas.

Para comenzar el proyecto, se realizará un estudio bibliográfico de la teoría que propondrían Jiles-Atherton que, básicamente, consiste en obtener, mediante ecuaciones de magnetismo y parámetros del material, una relación entre el campo magnético y la inducción magnética para así obtener la curva de magnetización de un material ferromagnético.

Tras comprender la teoría propuesta, se implementará el modelo de Jiles-Atherton que caracteriza un material ferromagnético con el fin de obtener su curva de histéresis. Una vez se implementa el modelo, se realizarán ensayos pertinentes para comprender el funcionamiento del modelo propuesto.

Después de realizar las pruebas pertinentes del modelo Jiles.Atherton, se decide implementar en la herramienta Simulink® un diagrama de bloques que simule el funcionamiento de un transformador de intensidad, mediante el cual se sea capaz de obtener la intensidad secundaria del mismo, a partir de parámetros que definen el transformador, así como una intensidad primaria. Una vez se modele dicho diagrama de bloques, se simulará el núcleo magnético del transformador de intensidad mediante el modelo de Jiles-Atherton de un material ferromagnético, con el fin de caracterizar la magnetización del mismo, y a su vez la saturación, que, tal como se explicará en la memoria del presente proyecto, es importante. Se utiliza dicho modelo por la similitud existente entre el núcleo magnético del transformador y un material ferromagnético.

Una vez se consiga obtener un modelo fiel al funcionamiento de un transformador de intensidad real, se llevarán a cabo estudios de contingencias reales en el transformador de intensidad, para comprobar que el modelo es fiel a la realidad. Se propondrán casos basados en experiencias anteriores tales como un estudio de cortocircuito en la red, el cual mostrará como el transformador es capaz de leer toda la intensidad entrante y mostrar la intensidad secundaria en su medida.

Tras realizar todo lo explicado anteriormente, se propondrán unos resultados en base a las pruebas realizadas, que darán pie a las conclusiones que se pueden sacar del modelo propuesto. Además, se realizarán propuestas para la mejora del modelo presentado en este documento.

Es importante destacar, que la redacción de este proyecto e implementación del modelado no requiere de ninguna reglamentación o normativa vigente para llevarlo a cabo, debido a que se debe a un trabajo teórico.

2. TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD

2.1 Misión

Un transformador de intensidad (por sus siglas T.I.), es un equipo que toma una corriente primaria y proporciona una corriente secundaria proporcional a la primaria separando galvánicamente los circuitos primario y secundario. Para cumplir esta misión el transformador de intensidad dispone de un arrollamiento primario, un arrollamiento secundario y un núcleo magnético.

El funcionamiento de estos dispositivos se basa en la inducción de un flujo magnético provocado por la circulación de corriente por el arrollamiento primario que circula por el núcleo de hierro del transformador, induciendo una f.e.m. en el arrollamiento secundario que da origen a una corriente.

Una característica muy importante de un T.I. es la de proporcionar una separación galvánica de circuitos, permitiendo un mayor aislamiento en los equipos conectados en serie en el secundario del T.I. (relés de protección, contadores, instrumentos de medida, etc). Otra característica importante de los T.I. es que las intensidades secundarias de estos equipos están normalizadas (habitualmente 5 A, aunque en algunos casos se utilizan intensidades de 1 A), lo que permite utilizar equipos estándar (de 5 A) sea cual sea la intensidad que circula por el circuito de potencia. Además de las características mencionadas, los T.I. evitan perturbaciones electromagnéticas y reducen las corrientes de cortocircuito que circulan por los aparatos de medida, con lo que los esfuerzos a los que están sometidos son menores.

En un transformador, el flujo común es creado por la acción conjunta de los amperios-vuelta primarios y secundarios, de forma que se puede definir una intensidad magnetizante de la forma siguiente:

$$N_p \vec{I}_0 = N_p \vec{I}'_p - N_s \vec{I}_s \quad (2.1.1)$$

Donde N_p es el número de espiras del arrollamiento primario (en la mayoría de ocasiones 1) y N_s es el número de espiras del arrollamiento secundario.

Cuanto menor sea la intensidad magnetizante menor será el error del T.I. En el caso ideal de que la corriente magnetizante sea nula:

$$\vec{I}_s = \frac{N_p}{N_s} \vec{I}_p \quad (2.1.2)$$

El valor de la intensidad magnetizante depende del valor del flujo en el núcleo magnético. El flujo magnético engendra una f.e.m. que da origen a la intensidad secundaria expresada de la siguiente forma:

$$\vec{E}_s = (\vec{Z}_s + \vec{Z}_c) \cdot \vec{I}_s \quad (2.1.3)$$

Donde Z_s es la impedancia del arrollamiento secundario (resistencia y reactancia de dispersión).

De lo anterior, se deduce que la intensidad magnetizante es tanto más reducida cuanto menor sea la impedancia de carga conectada en el secundario. De ahí que los transformadores de intensidad se suelen utilizar en condiciones próximas al cortocircuito en el secundario del mismo.

2.2 Errores en los transformadores y sus causas

Como se indicó en el apartado precedente, la existencia de una corriente de magnetización implica la existencia de unos errores que afectan al funcionamiento del TI y deben ser tomados en cuenta para la selección y utilización del mismo.

- Error de relación ε_i : Es la diferencia entre el valor eficaz de la intensidad secundaria, multiplicada por la relación de transformación, y el valor eficaz de la intensidad primaria, expresada en porcentaje sobre la intensidad primaria.

$$\varepsilon_i(\%) = \frac{k_n \cdot I_s - I_p}{I_p} \quad (2.2.1)$$

- Error de fase δ_i : Es el desfase existente entre la corriente primaria y la secundaria expresado en grados.

Para evitar o minimizar los errores descritos, se deben tener en cuenta los siguientes puntos.

- Errores relacionados con los amperivuelatas: La creación de un flujo magnético requiere de un cierto campo magnético H , que está relacionado con los amperios-vuelta de magnetización. El número de amperivuelatas es directamente proporcional al número de espiras en el arrollamiento secundario del T. I., lo cual implica que el error de relación ε_i , sea inversamente proporcional al cuadrado del número de espiras del secundario.
- Errores causados por las chapas del T. I.: La creación del flujo magnético requiere de una intensidad de magnetización. Para que la intensidad de magnetización sea lo menor posible hay que construir el núcleo magnético con materiales de alta permeabilidad (como los materiales nanocristalinos) Además, para hacer que la permeabilidad μ sea máxima se debe trabajar con inducciones reducidas.
- Errores causados por la impedancia de carga: El aparato de medida (o relé de protección) conectado en el secundario de TI tiene una cierta impedancia. Por ello, para hacer que por este aparato de medida circule una corriente se precisa una cierta f.e.m. Para crear esta f.e.m. se precisa un flujo. La creación de este flujo no nulo requiere de una cierta intensidad magnetizante que influye en el error de relación ε_i . Por ello, cuanto mayor sea la impedancia secundaria mayor será el error, y se debe acotar la impedancia para no superar el error indicado por el fabricante. Esta impedancia a la cual se da el error indicado se denomina impedancia de precisión. Frecuentemente, lo que se proporciona es el producto de la impedancia de precisión por el cuadrado de la corriente nominal, que se denomina potencia de precisión.
- Errores debidos a las dimensiones del circuito magnético: Como se indicó, la inducción de trabajo en un T.I. es muy reducida. Para conseguir esa inducción reducida conviene que la sección del núcleo sea elevada. Como se indicó anteriormente, cuanto mayor sea la impedancia de carga mayor debe ser el flujo en el núcleo, por eso la sección del núcleo ha de ser proporcional a la potencia aparente, lo que se consigue aumentando la sección en la misma medida que la longitud de la línea media del circuito magnético del T.I.

2.3 Transformadores de medida y protección – Circuito equivalente

Los transformadores de corriente pueden ser, en función del objetivo para el que están diseñados, transformadores de medida o transformadores de protección. Ambos tipos de transformadores se diferencian en sus características de saturación, como se indicará posteriormente, pero comparten el mismo circuito equivalente, donde cabe destacar diferentes conceptos a tener en cuenta para la configuración de los parámetros del mismo:

- Tensión arrollamiento primario referido al secundario \vec{U}'_p .
- Impedancia arrollamiento primario referida al secundario \vec{Z}'_p .
- Corriente arrollamiento primario referida al secundario \vec{I}'_p .
- F.e.m. inducida en el secundario \vec{E}_s .
- Corriente de magnetización \vec{I}_0 .
- Impedancia de magnetización \vec{Z}_0 .
- Tensión en bornas del arrollamiento secundario \vec{U}_s .
- Corriente en el arrollamiento secundario \vec{I}_s .
- Impedancia del arrollamiento secundario \vec{Z}_s .
- Impedancia de la carga \vec{Z} .

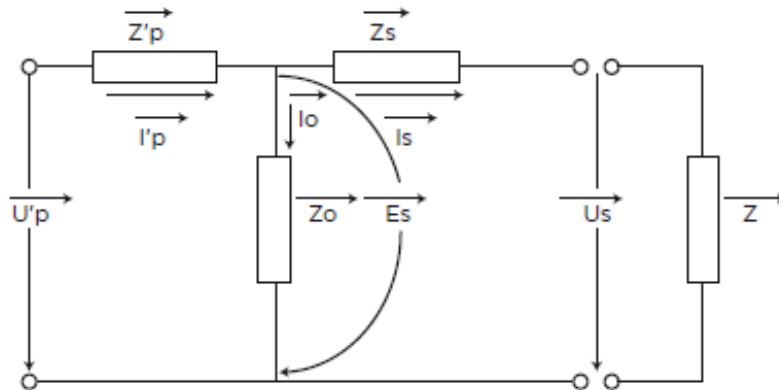


FIG. 1 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD [1]

A partir del circuito equivalente, se pueden definir diversas ecuaciones que modelan el circuito de las que se pueden obtener datos como la inducción necesaria en el núcleo del transformador para alimentar la carga.

$$\vec{E}_s = \vec{U}_s + \vec{Z}_s \cdot \vec{I}_s \quad (2.3.1)$$

Habiendo obtenido, mediante la segunda ley de Kirchhoff, la ecuación del flujo electromagnético en el núcleo, se pueden relacionar los valores al arrollamiento primario, mediante:

$$\vec{I}'_p = \vec{I}_0 + \vec{I}_s \quad (2.3.2)$$

$$\vec{U}_s = \vec{Z} \cdot \vec{I}_s \quad (2.3.3)$$

Así pues, al sustituir las ecuaciones (2.2.2) y (2.2.3) en la ecuación (2.2.1) se obtiene la f.e.m. en la rama magnetizante.

$$\vec{E}_s = \vec{Z} \cdot \vec{I}_s + \vec{Z}_s \cdot \vec{I}_s = \vec{I}_s \cdot \vec{Z}_t \quad (2.3.4)$$

A partir de lo obtenido, mediante la ecuación de Boucherot, se puede relacionar la inducción en el núcleo del transformador con la f.e.m. secundaria obtenida en la ecuación (2.2.4).

$$\vec{E}_s = 2,22 \cdot \frac{f}{50} \cdot N \cdot \vec{B} \cdot S \cdot 10^{-6} \quad (2.3.5)$$

Cuyos parámetros quedan definidos de la siguiente manera:

$f \equiv$ Frecuencia de la red

$\vec{B} \equiv$ Inducción necesaria en el núcleo

$N \equiv$ Número de espiras

$S \equiv$ Sección neta del núcleo

Enunciada la ecuación de Boucherot (2.2.5), sustituyendo en (2.2.4), se puede llegar a que la inducción necesaria en el núcleo es:

$$\vec{B} = \frac{\vec{I}_s \cdot \vec{Z}_t}{2,22 \cdot N \cdot S} \cdot 10^{-6} \quad (2.3.6)$$

De la ecuación (2.2.6), se puede llegar a la conclusión de que la inducción en el núcleo \vec{B} , será proporcional a la corriente secundaria si la carga total en el secundario permanece constante.

2.3.1 Transformadores de medida

Este tipo de transformadores son destinados para reducir las magnitudes primarias de la red a la que se conectan a valores normalizados para alimentar los equipos de medida, los cuales se conectan en serie para obtener la corriente en el devanado secundario.

Para el diseño y selección de un transformador de medida se tendrán en cuenta los siguientes conceptos:

- Corriente nominal de seguridad: Se trata de la corriente primaria para la cual, el transformador empieza a estar en estado de saturación. En ese instante, la corriente secundaria multiplicada por la relación de transformación nominal, ha de ser de menor valor del 90% de la corriente primaria.

$$k_n \cdot I_{ss} < 0,9 \cdot I_{ps} \quad (2.3.1.1)$$

Donde:

$k_n \equiv$ Relación de transformación nominal

$I_{ss} \equiv$ Corriente secundaria

$I_{ps} \equiv$ Intensidad nominal de seguridad

- Factor nominal de seguridad: Es la intensidad primaria de seguridad expresada como múltiplo de la intensidad asignada del transformador.

$$F_s = \frac{I_{ps}}{I_{pn}} \quad (2.3.1.2)$$

Cuyo parámetro desconocido es:

$I_{pn} \equiv$ Intensidad nominal primaria

- Clase de precisión: Es el límite del error de relación estando el transformador alimentando la carga de precisión. Se expresa en tanto por ciento para la intensidad nominal primaria.
 - o Clase 0,1 → Laboratorios.
 - o Clase 0,2 → Laboratorios, patrones portátiles, contadores de precisión.
 - o Clase 0,5 → Contadores normales y aparatos de medida.
 - o Clase 1 → Aparatos de cuadro.
 - o Clase 3 → Usos en los que no se requiere tanta precisión.
 - o Clase S → Clase extendida.

2.3.2 Transformadores de protección

Los transformadores de protección, son dispositivos que se destinan a alimentar relés de protección. Este tipo de transformadores, deben asegurar una precisión suficiente para intensidades de valor igual a varias veces la intensidad nominal de diseño.

Al igual que los transformadores de medida, en los transformadores de protección se deben tener en cuenta varias características en función de las necesidades del sistema.

- Error compuesto: se define como el valor eficaz de la diferencia entre los valores instantáneos de la intensidad primaria i_p y el producto de la relación de transformación nominal k_n por los valores de intensidad real del arrollamiento secundario i_s a lo largo de un período. Se expresa en tanto por ciento, y viene dado por:

$$\Sigma_c (\%) = \frac{100}{I_p} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (k_n \cdot i_s - i_p)^2 dt} \quad (2.3.2.1)$$

Esta definición es totalmente válida en caso de que los valores i_s e i_p sean funciones no sinusoidales. Para cuando las funciones mencionadas sean sinusoidales, la función (2.2.2.1) queda reducida a la suma vectorial del error de intensidad ε_i y del error de fase δ_i .

$$\Sigma_c (\%) = \sqrt{\varepsilon_i^2 - \delta_i^2} \quad (2.3.2.2)$$

- Intensidad límite de precisión nominal: Definida como el valor más elevado de la intensidad primaria, para la que el equipo proporciona un error especificado por el fabricante teniendo conectado en su secundario la impedancia de precisión.
- Factor límite de precisión nominal: Es la relación entre la intensidad límite de precisión nominal y la intensidad nominal primaria. Es un factor, que depende directamente de la carga que se conecta al transformador y se puede calcular, mediante la ecuación:

$$FLP_{real} = FLP_{nominal} \cdot \frac{R_b + R_{CT}}{R'_b + R_{CT}} \quad (2.3.2.3)$$

Cuyas variables son:

$R_b \equiv$ Carga de precisión

$R'_b \equiv$ Carga real conectada al transformador

$R_{CT} \equiv$ Resistencia interna del transformador

2.4 Fenómenos a tener en cuenta en el modelado

Para el modelado de un T.I. se han de tener en cuenta los fenómenos que a continuación se explicarán.

2.4.1 Saturación

Este efecto provoca que se pierda la proporcionalidad entre la tensión secundaria del T.I. y la corriente en el arrollamiento secundario. El fenómeno es consecuencia de la no linealidad de la curva B-H de las chapas magnéticas, que hace que la corriente precisa para crear una inducción magnética (B) elevada no sea proporcional a la precisa para crear una inducción inferior.

En el modelo que se desea obtener, se observará como varía la saturación del núcleo magnético en base a su codo de saturación, que es el punto a partir del cual, un incremento de un 10% de la tensión de excitación produce un incremento del 50% de la corriente de excitación.

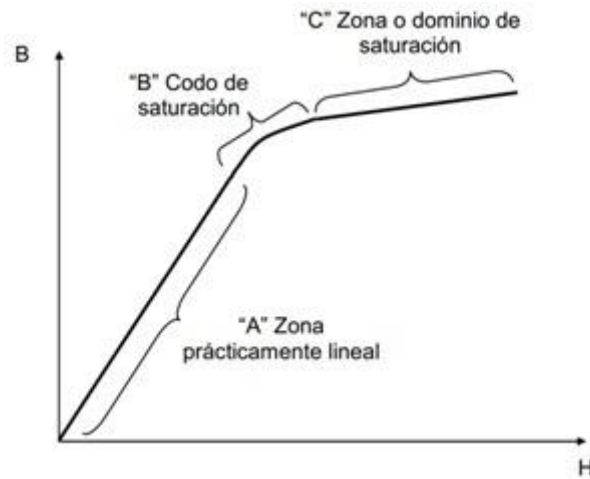


FIG. 2 REPRESENTACIÓN DE LA CURVA DE SATURACIÓN DE UN T.I. [2]

En lo descrito hasta el momento, se analiza el efecto de la saturación en régimen permanente, sin embargo, en la búsqueda de la idoneidad de un T.I. en una aplicación real, también es necesario estudiar la saturación en régimen transitorio, con especial énfasis en los primeros ciclos del mismo. Para ello, se debe calcular el factor de sobredimensionamiento transitorio, que dependerá del tiempo que debe permanecer el T.I. sin saturar.

$$K_{tf}(t) = \frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(\frac{e^{-t}}{T_2} - \frac{e^{-t}}{T_1} \right) + 1 \quad (2.4.1.1)$$

Donde las variables a tener en cuenta son:

$$T_1 \equiv \text{Constante del circuito } \frac{L}{R} \text{ del primario}$$

$$T_2 \equiv \text{Constante de tiempo del transformador}$$

En la mayoría de los casos, el transitorio se suele dar en maniobras de reenganche, por ello, la ecuación (2.4.1.1) debe sustituirse por:

$$K_{tf}(t) = \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(\frac{e^{-t}}{T_2} - \frac{e^{-t}}{T_1} \right) + 1 \right] \cdot e^{\frac{-FRT+T_D}{T_s}} + \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(\frac{e^{-T_D}}{T_2} - \frac{e^{-T_D}}{T_1} \right) + 1 \right] \quad (2.4.1.2)$$

Donde los valores más importantes se definen como:

$FRT \equiv$ Tiempo muerto del ciclo de reenganche

$T_D \equiv$ Tiempo a partir del cual se permite la saturación

2.4.2 Comportamiento del T.I. en circuito abierto

Para la comprensión del funcionamiento de un T.I. es importante conocer, cómo reacciona el transformador en condiciones de circuito abierto. En este caso, la carga conectada se puede considerar de impedancia infinita con lo que la corriente secundaria es nula, lo que hace que toda la corriente primaria, sea corriente de excitación del transformador. Este fenómeno provocará que el T.I. saturará para un valor de intensidad primaria bastante bajo, en función de la longitud del núcleo, haciendo que se produzca una sobretensión en el secundario cuyo valor de pico es proporcional a la intensidad primaria, lo que deriva en un posible fallo de aislamiento. Debido al aumento de tensión en bornes del secundario, el flujo en el núcleo aumenta su pendiente, provocando grandes pérdidas llegando a generar una subida de temperatura inadmisible habiendo riesgo de explosión.

2.4.3 Polaridad

Es importante conocer el sentido de los arrollamientos de los devanados primarios y secundarios porque influye en el sentido de la circulación de corriente en el secundario respecto a los aparatos que tiene el T.I. conectados en serie.

En el caso de los T.I. enfocados a la medida, es importante ya que según la polarización, se definirán los sentidos de la potencia y la energía.

En referencia a los T.I. utilizados para la protección, la polaridad del transformador define la posición del equipo respecto a los elementos a proteger.

2.4.4 Histéresis

Para definir este fenómeno, en primer lugar, se debe exponer a qué es debida la saturación de los materiales ferromagnéticos. Para ello se hará mención a la teoría de los dominios magnéticos, la cual explica que cualquier material ferromagnético está formado por zonas donde los átomos tienen sus momentos magnéticos alineados. En ausencia de un campo magnético externo, la alineación de las zonas es diferente, por ello, el material no presenta magnetismo a escala macroscópica. Sin embargo, ante la existencia de un campo magnético externo, aquellas zonas que tengan su momento magnético orientado en la dirección del campo magnético externo empezarán a crecer en detrimento de los dominios vecinos. Si el campo magnético aumenta más su valor, las zonas cuyo momento magnético no estaban alineadas inicialmente con el campo magnético, sufrirán una rotación consiguiendo una alineación total en la dirección del campo externo.

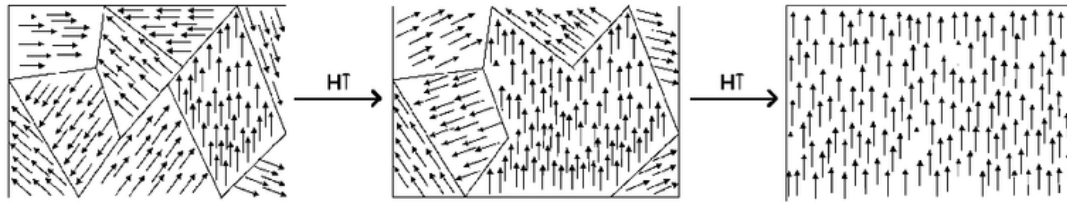


FIG. 3 EVOLUCIÓN DE DOMINIOS MAGNÉTICOS ANTE UN CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO [3]

Por este comportamiento, la inducción obtenida en los materiales ferromagnéticos es muy elevada. Una vez que se han orientado casi todos los dominios, el material se encuentra completamente saturado, por ello, a partir de ese punto, el incremento de inducción se debe exclusivamente al incremento de campo magnético externo.

El fenómeno de la histéresis supone que con un determinado valor del campo magnético (H) la inducción creada (B) puede tener dos valores distintos tras un aumento y posterior disminución del campo magnético H . La figura 4 ilustra este fenómeno. Si se aumenta el valor del campo magnético desde 0 hasta un valor H_0 , cuando se alcanza este valor H_0 en el material magnético el valor de la inducción es B_0 . Si se sigue aumentando el campo magnético externo hasta un valor H_{\max} , la inducción también aumentará hasta un valor B_{\max} mediante la reorientación de los dominios magnéticos. Si a partir de ese instante, se comienza a disminuir el campo magnético, muchos de los dominios retornan a su posición inicial, pero debido a que la rotación de las zonas implica un consumo energético, habrá una cierta cantidad que no rote hasta su posición de reposo, por ello, la inducción no disminuirá hasta sus valores iniciales, sino que tendrá otro valor B_2 mayor que B_0 .

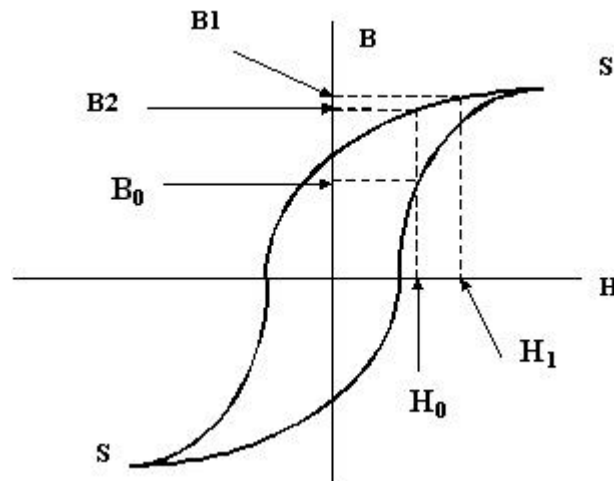


FIG. 4 CICLO DE HISTÉRESIS [4]

A partir de todo lo explicado, se puede concluir que el fenómeno de histéresis no solo depende del campo magnético externo aplicado, sino que también depende del aumento o disminución del mismo.

2.3.5 Resistencias y reactancias

Debido a que un T.I. es un circuito magnético, se podrá representar mediante resistencias y reactancias que simulan el funcionamiento del mismo, facilitando el cálculo y el modelado del equipo que se está estudiando.

El circuito magnético al que se hace referencia (Fig. 1), consta de una impedancia primaria, una impedancia secundaria, una impedancia en la rama magnetizante y la impedancia de carga. Tanto la impedancia primaria, como la secundaria, son de un pequeño valor y buscan el mayor flujo de corriente posible por sí mismas.

En cuanto a la rama magnetizante, como se ha explicado en apartados anteriores, es donde se engendra la f.e.m que a posteriori inducirá una corriente en el secundario. Por estas razones, la impedancia de esta rama, será de mayor valor que las impedancias primaria y secundaria, buscando la menor circulación posible de corriente por ella.

Las resistencias y reactancias del transformador han sido medidas con un equipo Omicron CT-Aanlizer. Los resultados obtenidos se muestran en el apartado 5.2.1 Parámetros de entrada.

3. HERRAMIENTAS PARA EL MODELADO

3.1 Descripción de la herramienta Simulink®

Simulink® es una herramienta que se utiliza en el entorno MATLAB® para simular, modelar y analizar sistemas dinámicos. El programa madre MATLAB®, está desarrollado por la compañía “*The MathWorks Inc*”, la cual realiza actualizaciones anuales del software, así como de las herramientas que se pueden utilizar y de sus extensiones.

La herramienta que se utiliza en el modelado es capaz de simular modelos discretos, continuos o ambos a la vez, mediante sistemas de ecuaciones tanto lineales, como no lineales, sistemas multifrecuencia, o ecuaciones diferenciales. Simulink® es interesante, porque además de incluir controles de menú, barras de herramientas, controles deslizantes, etc. tiene la opción de incluir aplicaciones con interfaces personalizadas en base a las necesidades del usuario.

3.2 Fases de la simulación

La herramienta Simulink® posee dos fases para llevar a cabo una simulación. Primero el programa necesita que se le defina el modelo mediante la construcción del mismo a partir de elementos básicos creados por la compañía anteriormente, tales como bloques de ganancias, integradores, sumatorios, etc.

Para continuar, Simulink® realiza un análisis de datos del modelo mediante simulaciones en el tiempo preestablecido, hasta obtener el punto de equilibrio objetivo.

3.3 Biblioteca de bloques

En Simulink® se pueden encontrar varios grupos de bloques previamente creados, así como bloques personalizables y/o creados por el usuario. Algunos de los grupos básicos de los que consta la biblioteca de Simulink® son:

- Continue: Son elementos y conexiones que se utilizan para sistemas lineales y en tiempo continuo. También existen funciones de transferencia con retardos.
- Discontinues: Bloques utilizados en ecuaciones no lineales, especialmente con diferentes tipos de saturación.
- Discrete: Son elementos que forman parte de sistemas lineales y son capaces de desarrollarse en tiempos discretos. En esta biblioteca se pueden encontrar funciones de transferencia y diagramas de estado.
- Logic and bit operations: En este grupo, existen funciones que permiten realizar operaciones lógicas en lenguaje binario.
- Lookup tables: Mediante los bloques que contiene este grupo, se puede construir una gráfica de n-dimensiones mediante datos del mismo tamaño.
- Math operations: Las funciones por las que destacan los bloques de este tipo, son que permiten realizar operaciones matemáticas tanto en dominio real, como en imaginario.
- Model verification: Son etapas que, a partir de su utilización, permiten al usuario llevar una supervisión de las señales del sistema a modelar con el fin de confirmar cuando dicha señal se encuentra fuera de los límites especificados, pudiendo hasta a llegar a parar la simulación si se desea.

- Ports & subsystems: En la presente biblioteca, se disponen de bloques que contribuyen a la reducción de los diagramas, mediante la simplificación jerárquica a través de subsistemas.
- Signal attributes: Mediante los bloques de este grupo, se permite acabar una simulación, cuando las características de la entrada en el bloque son distintas a las especificadas.
- Signal routing: Básicamente, se tratan de bloques que permiten el paso de una señal a partir de una configuración previa. Se pueden encontrar multiplexores, demultiplexores, interruptores, etc.
- Sinks: Contiene bloques para crear salidas a subsistemas, así como, para visualizar gráficamente la simulación objetivo.
- Sources: Se encuentran la gran mayoría de tipos de generadores de funciones.
- User-defined functions: Mediante las opciones que permiten los bloques de esta biblioteca, se permite al usuario crear funciones matemáticas. Además, se pueden encontrar una diversidad de librerías de áreas especializadas como telecomunicaciones, control, sistemas eléctricos, mecánicos, etc.
- Additional math & discret: Contiene bloques de funciones que permiten añadir al sistema que se pretende simular, sistemas de retardo, incrementados o decrementos.
- Commonly used blocks: En esta librería, se agrupan los bloques mayormente usados de entre todas las librerías mencionadas anteriormente.

Cabe destacar, la posibilidad de incluir bibliotecas de bloques, así como extensiones que son útiles para el estudio estadístico, económico y de ciencias mucho más específicas.

3.4 Simulación de un modelo desde Simulink®

Tras la construcción del diagrama de bloques objetivo, se puede realizar la simulación del mismo a partir del menú de órdenes de Simulink®. Los datos obtenidos se pueden visualizar mediante la incorporación de bloques de visualización al diagrama que se está estudiando. Además, si fuera necesario, se pueden extrapolar los datos obtenidos al entorno Matlab® para su posterior tratamiento.

Para llevar a cabo una simulación correcta, se hará uso del menú *Model Configuration Parameters*, donde se puede visualizar el siguiente cuadro de diálogos:

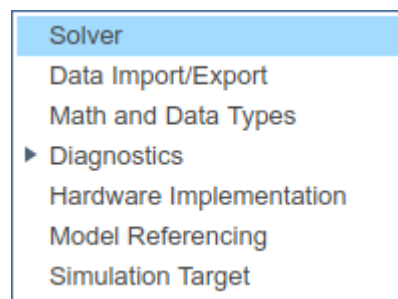


FIG. 5 DIÁLOGO DEL MENÚ MODEL CONFIGURATION PARAMETERS

En el menú mencionado anteriormente, se realiza la configuración de los parámetros que se van a utilizar en la simulación. Como se observa en la Fig. 5, existen diferentes tipos de configuración, pero por simplicidad, y debido a la extensa utilización que se

puede hacer del software, solo se explicará el submenú *Solver*, que es el que se modificará en el modelo del presente trabajo.

3.4.1 Opciones para la simulación (*Solver*)

En el presente submenú, se permiten realizar cambios en los parámetros de la simulación, tales como el tiempo de simulación, la selección del método de integración y los detalles de la simulación.

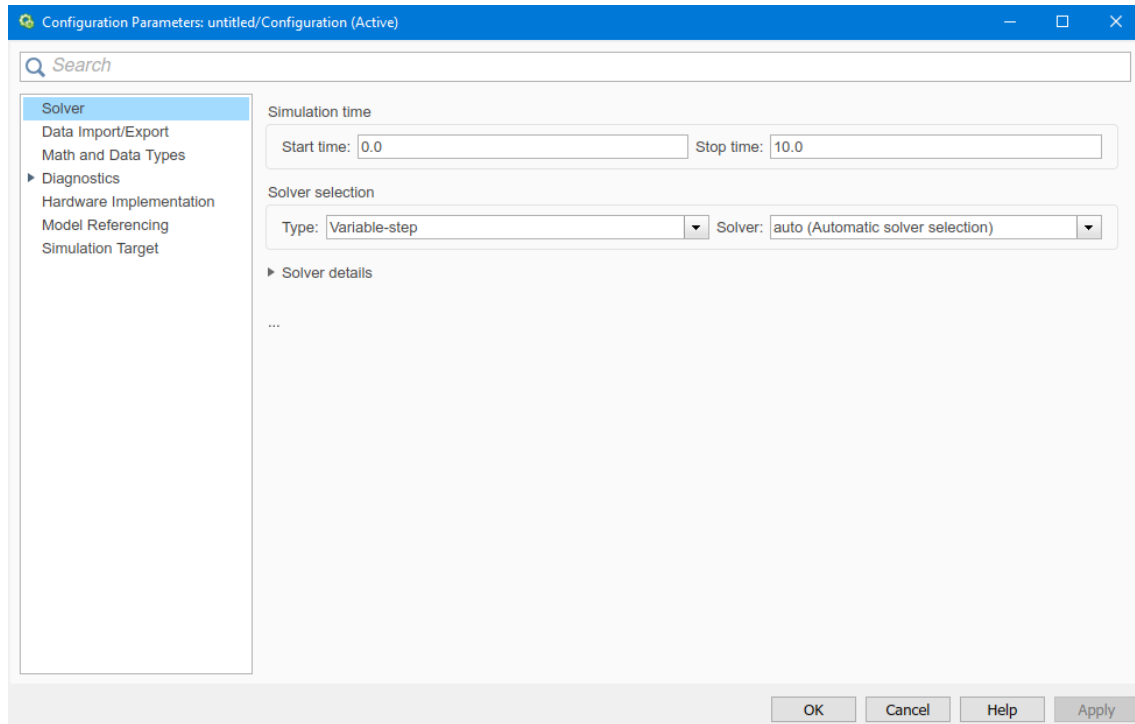


FIG. 6 SUBMENÚ SOLVER

3.4.1.1 Tiempo de simulación (*Simulation time*)

Para la configuración en la simulación del modelo, se tendrán en cuenta los parámetros *Start time* y *Stop time*, los cuales, determinan los valores de inicio y final de la simulación respectivamente. Cabe destacar, que el tiempo real de la misma, no se trata de la diferencia entre el tiempo de inicio y el tiempo final, sino que depende de la complejidad del diagrama de bloques, de los tamaños de los pasos mínimo y máximo y del ordenador con el que se ejecuta la simulación.

3.4.1.2 Selección del método de integración (*Solver selection*)

En el menú *Solver selection* se elige el método matemático que usará la herramienta Simulink® para desarrollar la simulación del modelo objetivo.

Para explicar el procedimiento que realiza el Simulink® al ejecutar la simulación, se recurrirán a ecuaciones diferenciales ordinarias (*ODES*), que se elegirán en base a la efectividad de los mismos para realizar la simulación.

Antes de elegir la ecuación diferencial que se utilizará para la simulación, se elegirá el método de integración, a saber:

- Paso variable (*Variable-Step*): Permite la variación en el tamaño del paso durante la simulación. Ello permite reducir el tiempo de simulación en el caso de

que la evolución de la función a integrar sea muy lenta, mientras que el paso se reduce en aquellas zonas en las que la función evoluciona de forma más rápida. Si se eligiese este método de integración, existen distintas ecuaciones diferenciales ordinarias que harán más o menos efectivo el procedimiento que seguirá Simulink® para ejecutar la simulación y se pueden diferenciar de la siguiente manera:

- ODE45: Se trata de un método que consta de un solo paso, el cual utiliza el punto anteriormente calculado para buscar el siguiente punto.
- ODE23: En caso de que el modelo posea una alta tolerancia, es un método que, en principio, puede ser más eficiente al ODE45. En cualquier caso, es un método que toma pasos de integración grandes, gracias a los cuales, el sistema es capaz de obviar aquellos instantes en los que el modelo alcance el estado estacionario.
- ODE113: Se trata de un método multipaso que adopta datos de puntos anteriores para obtener la solución de la simulación. Es el más eficaz para sistemas cuya tolerancia sea ajustada.
- ODE15s: Al igual que los métodos ODE23 y ODE113, toma varios pasos de integración, y se basa en las fórmulas de diferenciación numérica *NFD*.
- ODE23s: Es bastante eficaz para sistemas con alta tolerancia, y se trata de un método que toma un solo paso de integración.
- *Discrete*: Es el método óptimo para cuando el modelo a simular no consta de estados continuos.
- Paso fijo (*Fixed-Step*): En caso de elegir este método de integración, en la simulación se tomará únicamente un paso fijo, que se mantendrá constante durante toda la simulación. Al igual que el paso variable, se pueden elegir diferentes opciones de ecuaciones diferenciales ordinarias:
 - ODE45: Es el equivalente de paso fijo descrito anteriormente.
 - ODE4: Este método, toma la fórmula Runge-Kutta de orden 4.
 - ODE3: Es la versión de paso fijo del método ODE23 de paso variable mencionado anteriormente.
 - ODE2: Utiliza el método de Heun, y es similar a la fórmula de Euler, por ello, es conocido también como el método mejorado de la fórmula de Euler.
 - ODE1: Es un método que utiliza la fórmula de Euler.
 - *Discrete*: Utiliza un paso fijo pero funciona sin integrar. Es óptimo, al igual que en el paso variable, para sistemas sin estados continuos.

3.4.1.3 Detalles de la simulación (*Solver details*)

Para ejecutar la simulación, se deberá tener en cuenta este apartado, en el cual, se seleccionarán, en base al tipo de paso de integración seleccionado, detalles tales como el tamaño del paso de integración, la tolerancia que se admite en el modelo, etc.

- En el caso de que se haya seleccionado un paso de integración fijo, se selecciona el tamaño o también conocido como tiempo fundamental de muestreo del mismo, en función de las necesidades del modelo.

Fixed-step size (fundamental sample time): 100e-6

FIG. 7 SELECCIÓN DEL TIEMPO DE MUESTREO FUNDAMENTAL

Además, en este menú, se pueden seleccionar las opciones de las tareas y tiempos de muestreo.

Tasking and sample time options

Periodic sample time constraint: Unconstrained

☐ Treat each discrete rate as a separate task

☐ Allow tasks to execute concurrently on target

☐ Automatically handle rate transition for data transfer

☐ Higher priority value indicates higher task priority

FIG. 8 SELECCIÓN DE LAS OPCIONES DE LAS TAREAS Y TIEMPOS DE MUESTREO

Donde se pueden seleccionar las restricciones del tiempo de muestreo periódico.

- En el supuesto de elegir un paso de integración variable, el menú cambiará, y se podrán seleccionar opciones tales como tamaños máximos o mínimos de los pasos de integración, márgenes de error, etc. Se explicarán únicamente las opciones comúnmente utilizadas.

Max step size: auto Relative tolerance: 1e-3

Min step size: auto Absolute tolerance: auto

Initial step size: auto ☒ Auto scale absolute tolerance

FIG. 9 SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE PASO DE INTEGRACIÓN Y TOLERANCIAS DEL SISTEMA

- Tamaño de paso máximo (*Max step size*): Es un valor que determina el mayor tiempo de paso que utilizará el método de resolución. Por norma general, el valor del paso máximo, será función del tiempo de inicio y final de la simulación.
- Tamaño de paso mínimo (*Min step size*): Por defecto, la herramienta Simulink®, tomará el valor de este término en función del tiempo inicial de la simulación. En el caso de que paso mínimo seleccionado no cumpla con la tolerancia configurada, Simulink® lo reducirá.
- Tolerancia relativa (*Relative tolerance*): Mide el error relativo de cada fase de la simulación. El valor que se elige, determina la precisión que tendrá Simulink® a la hora de simular el modelo.
- Tolerancia absoluta (*Absolute tolerance*): Es el valor del umbral del error y simboliza como error tolerable la medida de la fase de la simulación más cercana a cero.

4. MODELO JILES-ATHERTON DE UN TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

Como se ha comentado en el inicio de la presente memoria, se pretende simular un transformador de intensidad representando el comportamiento del núcleo magnético mediante el modelo Jiles-Atherton (J-A por sus iniciales).

4.1 Teoría Jiles-Atherton de materiales ferromagnéticos

Los científicos David Jiles y D. L. Atherton propusieron que, para estudiar un material ferromagnético, se debía conocer la magnetización de mismo, y partir de ahí se podría obtener la curva de histéresis que caracteriza un material ferromagnético, por ello basaron su teoría en dicho concepto.

La teoría en sí, se basa en la utilización de ecuaciones no lineales de primer orden, cuya solución final, se puede obtener a partir de cinco parámetros que pueden ser obtenidos mediante mediciones experimentales.

Para el desarrollo de la teoría principalmente se debe separar la magnetización de un material en su proceso reversible e irreversible (4.1.1). A partir de este punto, mediante ecuaciones conocidas de magnetismo, se puede llegar al objetivo final, que no es otro que modelar la curva de histéresis de un material ferromagnético.

$$M = M_{rev} + M_{irrev} \quad (4.1.1)$$

Como se ha explicado, la teoría basa su algoritmo en ecuaciones diferenciales no lineales, ya que se busca el comportamiento de la magnetización de un material ferromagnético ante un campo magnético. Por ello, la ecuación (4.1.1), realmente pasará a ser para el presente estudio de la siguiente manera:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{dM_{rev}}{dH} + \frac{dM_{irrev}}{dH} \quad (4.1.2)$$

A partir de la ecuación (4.2.2), se pueden empezar a desarrollar cada uno de los parámetros de tal manera que simplifiquen la comprensión de la misma.

Primeramente, se desarrollará la componente irreversible de la magnetización, la cual tiene en cuenta las pérdidas de potencia activa que se producen durante el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos, que es la causa de que el proceso no sea ideal.

$$\frac{dM_{irrev}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irrev}}{\delta \cdot k - \alpha(M_{an} - M_{irrev})} \quad (4.1.3)$$

En la ecuación (4.1.3) aparecen parámetros que se pueden definir tal que:

$\delta \equiv$ Parámetro direccional que toma valores 1 o -1 en función del signo de la derivada del campo magnético H (crece o decrece respectivamente)

$k \equiv$ Constante

$\alpha \equiv$ Factor de acoplamiento del entrehierro

$M_{an} \equiv$ Componente de magnetización anhisterética, que se puede definir como la magnetización adquirida cuando se aplica un campo magnético continuo a un material

expuesto simultáneamente a un campo magnético alterno. Este factor se puede representar a partir de la ecuación de Langevin (4.1.4):

$$M_{an} = M_s \left(\coth \frac{H + \alpha M}{a} - \frac{a}{H + \alpha M} \right) \quad (4.1.4)$$

Donde el parámetro a es una característica física del material ferromagnético y M_s es el momento de saturación magnética del núcleo del material.

Una vez explicada la variación de la componente de magnetización irreversible ante un campo magnético, se puede hallar la evolución de la componente reversible, a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{dM_{rev}}{dH} = c \frac{d(M_{an} - M_{irrev})}{dH} \quad (4.1.5)$$

Donde aparece el parámetro c , que se trata del parámetro que determina hasta donde un material es reversible en base a la componente irreversible y anhisterética.

Tras comentar cada uno de los términos de la ecuación (4.1.2) se puede pasar a sustituir en la misma, para obtener el resultado final.

$$\frac{dM}{dH} = c \frac{d(M_{an} - M_{irrev})}{dH} + \frac{M_{an} - M_{irrev}}{\delta \cdot k - \alpha(M_{an} - M_{irrev})} \quad (4.1.6)$$

Que, tras simplificar, queda:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{1}{(1+c)} \frac{M_{an}}{\delta \cdot k / \mu_0 - \alpha(M_{an} - M)} + \frac{c}{(1+c)} \frac{dM_{an}}{dH} \quad (4.1.7)$$

Sin embargo, se observa que las derivadas son dependientes de un parámetro (H) distinto del tiempo, y en base a que el presente trabajo se ha modelado con la herramienta Simulink®, la cual solo es capaz de simular en el dominio del tiempo, es importante cambiar la ecuación (4.1.7) multiplicando en ambos lados del igual por $\frac{dH}{dt}$, resultando:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{(1+c)} \frac{dH}{dt} \frac{M_{an} - M}{\delta \cdot k / \mu_0 - \alpha(M_{an} - M)} + \frac{c}{(1+c)} \frac{dM_{an}}{dt} \quad (4.1.8)$$

Cabe destacar el objetivo final de esta teoría, que es obtener la curva de histéresis, la cual relaciona los parámetros B y H en un material magnético. Por ello, es básico relacionar las variables de la ecuación (4.1.8) con los parámetros objetivo, lo cual se obtiene a partir de:

$$H_e = H + \alpha M \quad (4.1.9)$$

$$B = \mu_0(H + M) \quad (4.1.10)$$

Tras analizar la teoría J-A mediante sus ecuaciones, se puede implementar un diagrama de bloques en la herramienta Simulink® a partir de las mismas, con el objetivo final de obtener una curva B-H de histéresis de cualquier material ferromagnético.

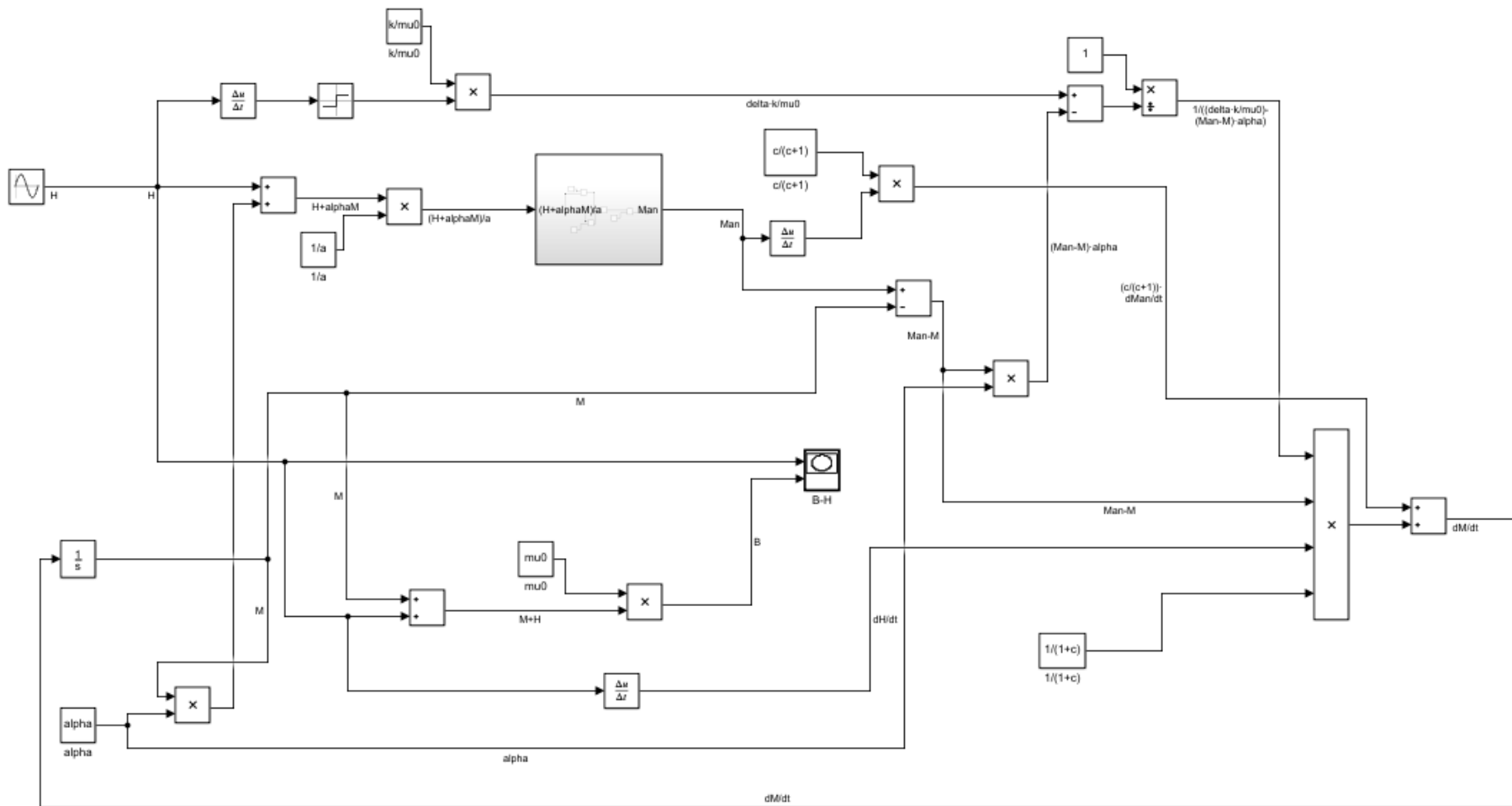


FIG. 10 MODELO JILES-ATHERTON EN SIMULINK®

Como se aprecia en la Fig. 10, hay una subrutina mediante la cual se calcula la componente anhisterética necesaria en la teoría presentada. Para ello, se recurre a la función de Langevin. Dicha subrutina, queda representada en la Fig.11.

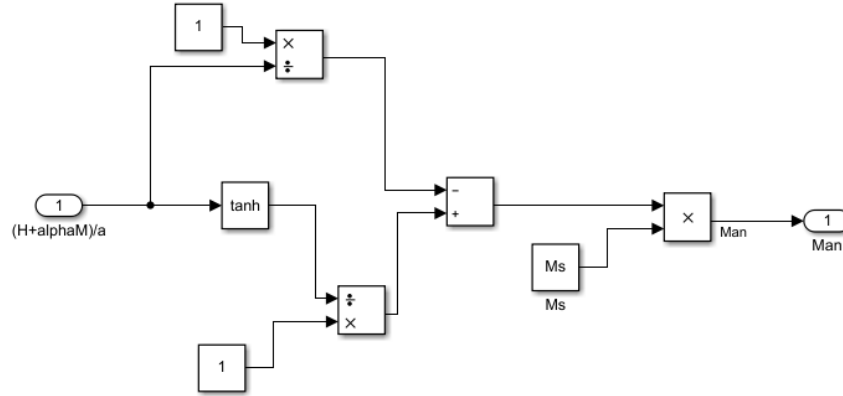


FIG. 11 FUNCIÓN DE LANGEVIN PARA LA OBTENCIÓN DE COMPONENTE ANHISTERÉTICA DE MAGNETIZACIÓN

4.2 Modelo de Transformador de Intensidad desarrollado en *Simulink*®

El modelo de transformador de intensidad que se ha utilizado depende de las ecuaciones que caracterizan el equipo, así como de fórmulas de electromagnetismo. Se ha elegido este procedimiento, para conseguir una medida cuantitativa de la intensidad en el secundario del T.I. que será utilizada como alimentación en el equipo al que se asocie el transformador, a partir de parámetros tales como, la inducción magnética, B, el campo magnético engendrado en el núcleo, H, la fuerza electromotriz, f.e.m. o E_s , etc.

El desarrollo del modelo elegido, parte de la ecuación fundamental de un transformador de intensidad:

$$I_0 N_p = I'_p N_p - I_s N_s \quad (4.2.1)$$

Donde la intensidad primaria I'_p , es la intensidad primaria referida al secundario del transformador, I_s e I_0 , son la intensidad en el secundario y la intensidad magnetizante, respectivamente. Esta ecuación, se puede relacionar con el campo magnético H en el núcleo del T.I. a partir de la ley de Ampere, resultando:

$$\frac{I_0 N_p}{L_{Fe}} = H \quad (4.2.2)$$

En cuya ecuación, se distingue el parámetro L_{Fe} , tratándose de la longitud del hierro del T.I.

A partir del cálculo de la inducción magnética B en el modelo J-A tratado, se puede decir que, ante una variación de la misma, se produce un flujo magnético de la forma:

$$\phi = \int B \cdot dS \quad (4.2.3)$$

Este flujo, en su variación en el tiempo, engendra una f.e.m en el medio con la ecuación:

$$\phi = \int E_s \cdot dt \quad (4.2.4)$$

Por ello, y relacionando ambas ecuaciones, se llega a que la f.e.m. que engendra el núcleo magnético del T.I. a estudiar tiene la forma:

$$\frac{dB}{dt} \cdot S = E_s \quad (4.2.5)$$

Siendo S la sección del núcleo magnético.

A partir de una de las ecuaciones fundamentales de un T.I. y conociendo la f.e.m. en la rama magnetizante, se puede obtener la intensidad en el secundario. En régimen permanente, la relación entre la f.e.m. y la corriente secundaria es:

$$E_s = I_s(Z_s + Z_c) \quad (4.2.6)$$

Sin embargo, el modelo que se está implementando es un modelo de régimen transitorio, por ello, se recurrirá a una función de transferencia equivalente a la ecuación (4.2.6) despejada respecto a I_s , cuyos parámetros dependerán de los valores de las resistencias e inductancias del T.I. y de la carga.

Así pues, la función de transferencia utilizada, será de la forma:

$$\frac{K}{1 + \tau s} \quad (4.2.7)$$

Cuya entrada será la f.e.m. y la salida será I_s .

Como se ha comentado anteriormente, la función de transferencia dependerá de los valores de las resistencias e inductancias tanto del T.I. como de la carga. Esta relación vendrá dada por los parámetros K y τ , tal que:

$$K = \frac{1}{R_s + R_c} \quad (4.2.8)$$

$$\tau = \frac{L_s + L_c}{R_s + R_c} \quad (4.2.9)$$

Después de tratar las ecuaciones utilizadas para simular el T.I. se le acoplará el modelo J-A realizado anteriormente, debido a la similitud entre el núcleo magnético de un transformador y un material ferromagnético, con el fin de obtener la curva B-H de histéresis del T.I. De esta manera, el modelo utilizado para la simulación es el mostrado en la figura siguiente:

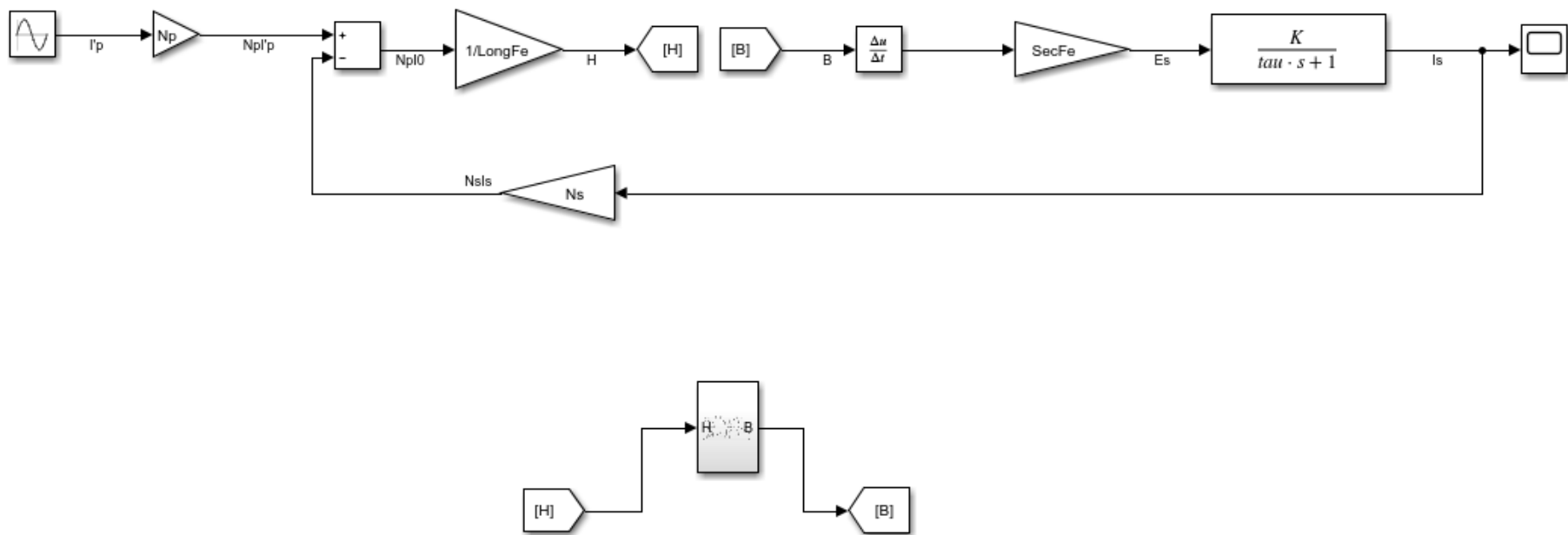


FIG. 12 MODELO JILES-ATHERTON DE UN TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

Tal y como se aprecia en la Fig. 12, existe una subrutina cuya entrada es el campo magnético, H , y la salida es la inducción magnética, B . Dicha subrutina, es el modelo Jiles-Atherton representado en la Fig. 10 en el apartado anterior.

El modelo basa su funcionamiento en la entrada de una intensidad primaria referida al secundario, a partir de la cual, mediante las ecuaciones enunciadas a lo largo del presente apartado, se obtiene la intensidad secundaria y la curva de histéresis objetivo.

5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS MODELOS

Tras finalizar el estudio de un transformador de intensidad y del modelo propuesto por los físicos Jiles-Atherton a partir de las ecuaciones que lo modelan, es interesante analizar los resultados arrojados en la simulación de los mismos.

El objetivo del presente capítulo, es dar una perspectiva del funcionamiento de los modelos desarrollados a lo largo del documento, así como propuesta para futuros trabajos relacionados con la materia acometida.

El capítulo se ha dividido en dos partes: en la primera de ellas se muestran los resultados del modelado del núcleo ferromagnético mediante en modelo de Jiles-Atherton y en la segunda se muestran los resultados del modelado del transformador utilizando el modelo verificado en la primera parte del capítulo. El objetivo es realizar un estudio del funcionamiento ante contingencias reales que se pueden dar en un sistema eléctrico.

Como parámetros de entrada de las simulaciones que se muestran en la primera parte de este capítulo se tomarán valores propuestos por diversos autores. No se han utilizado valores propios, ya que la obtención de valores ajustados al caso de este trabajo requiere realizar un proceso de optimización para obtener los parámetros del modelo que hagan que los resultados del mismo se aproximen lo mejor posible al transformador disponible.

5.1 Modelo Jiles-Atherton de materiales ferromagnéticos

Como se ha expuesto en el anterior capítulo, con el modelo J-A se es capaz de simular el comportamiento de un material ferromagnético a partir de la acción de un campo magnético al mismo, obteniendo la curva de B-H de histéresis.

5.1.1 Parámetros de entrada

Para realizar la simulación se han consultado modelos y parámetros propuestos por [5], de donde se han tomado los siguientes valores para inicializar el modelo con la finalidad de optimizar los resultados obtenidos:

Tabla 1 Parámetros de entrada modelo J-A [5]

PARÁMETRO	VALOR
M_s	$1,397 \cdot 10^6$
A	342
α	$6,407 \cdot 10^{-4}$
C	0,0011
μ_0	$1,26 \cdot 10^{-6}$
K	$3,115 \cdot 10^{-4}$

Como se ha mencionado, existe la posibilidad de variar los parámetros presentados en la Tabla 1 mediante un estudio en lazos de histéresis para adaptar el modelo a diferentes materiales ferromagnéticos utilizando un método iterativo.

El único parámetro de los enunciados que no puede ser cambiado es el valor de la permeabilidad eléctrica en el vacío, μ_0 , debido a su carácter constante de $4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,26 \cdot 10^{-6}$.

En cuanto a los parámetros configurados en la herramienta Simulink® son los expuestos en la Tabla 2, los cuales han sido configurados a partir de experiencia anterior con el software y de pruebas en base a la necesidad del modelo.

Tabla 2 Parámetros de configuración de Simulink®

Simulation time	
Start time	0 (s)
Stop time	0,1 (s)
Solver selection	
Type	Fixed-step
Solver	Ode4 (Runge-Kutta)
Solver details	
Fixed-step time	$10 \cdot 10^{-6}$ (s)

Otro parámetro de entrada importante, es el valor del campo magnético, H , que es la variable de entrada que debe introducirse para obtener la inducción magnética, que es la salida del modelo. El motivo de no incluirlo en la Tabla 1, es que dicho valor no es dependiente del material ferromagnético de estudio, pues es un valor dado a partir de una fuente externa al mismo de carácter sinusoidal.

5.1.2 Simulación principal

Para el caso concreto del presente documento, se ha simulado el modelo J-A (Fig. 10) a partir de una fuente de campo magnético de amplitud $H=2000$ A-v/m (Amperios-vuelta/m) con forma sinusoidal que ha sido modificada con una frecuencia angular de $100\pi \text{ rad/s}$.

Tras la configuración de la fuente de campo magnético, junto con los parámetros indicados en las Tablas 1 y 2, a partir del modelo, se puede obtener la curva de inducción magnética, que se muestra en la siguiente imagen:

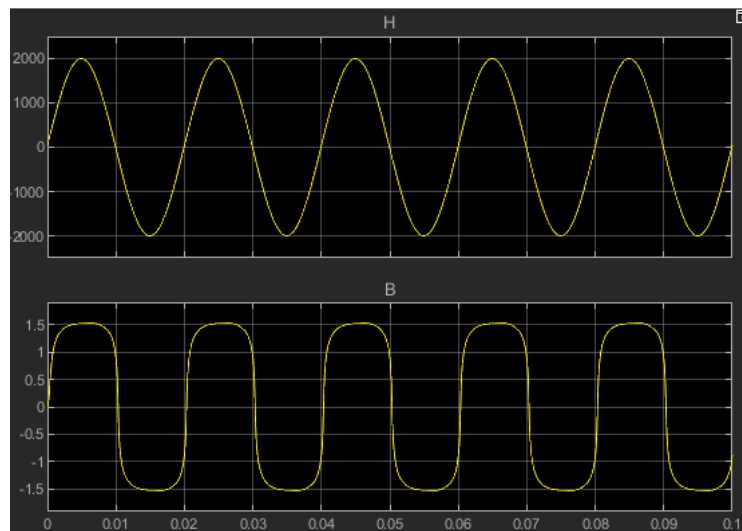


FIG. 13 FORMAS DE ONDA DE H Y B

Como se aprecia, la forma de onda de la inducción difiere de la sinusoidal, ello es debido a que en este ejemplo se ha tomado como variable de entrada un campo magnético sinusoidal mientras que la curva de magnetización es no lineal.

La forma de onda de la magnetización M se aprecia en la Fig. 14:

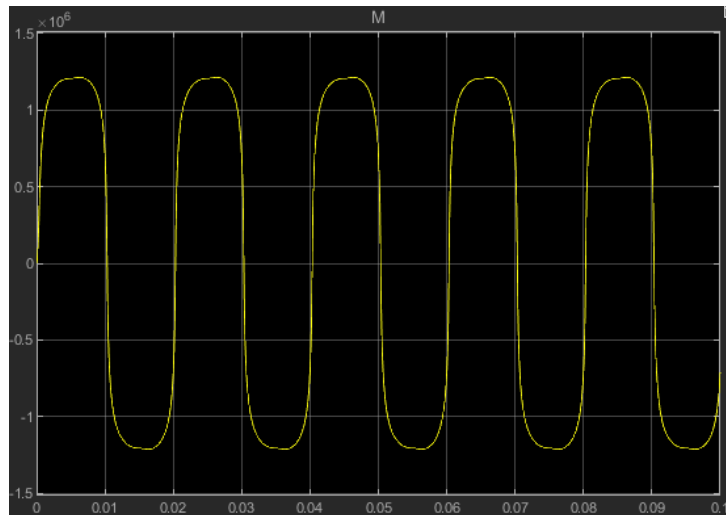


FIG. 14 FORMA DE ONDA DE LA MAGNETIZACIÓN, M

A partir de la onda de inducción magnética obtenida, se ha dibujado el ciclo de histéresis del material magnético, que se muestra en la figura siguiente:

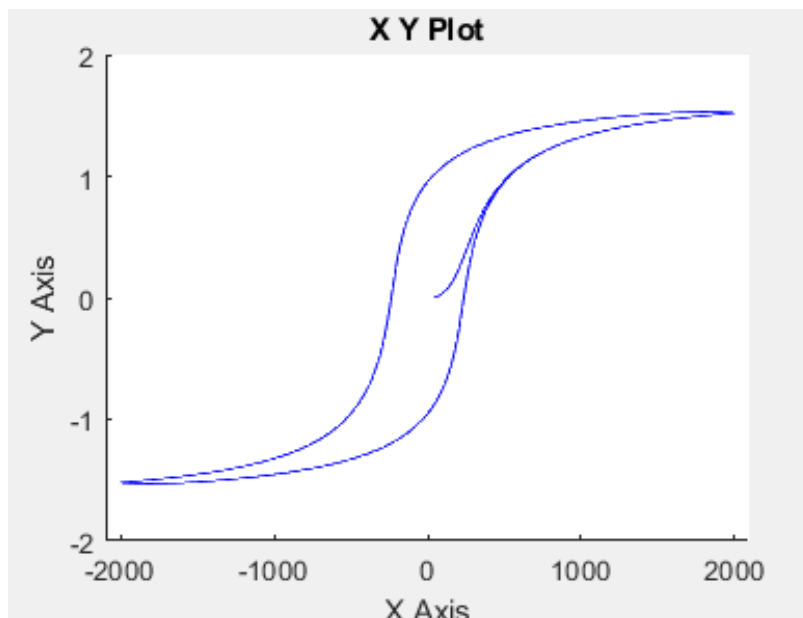


FIG. 15 CURVA B-H EN MODELO J-A

La Fig. 15, representa el lazo de histéresis objetivo alimentado por un campo magnético de 2000 A-v/m. Para simular el caso de un material inicialmente desmagnetizado se ha tomado como condiciones iniciales para la simulación $B=0$ y $H=0$, por los que inicialmente la curva de magnetización discurre por un camino diferente al lazo principal que se describe cuando las magnitudes alcanzan el régimen permanente.

La saturación del material magnético depende del valor del campo magnético aplicado. En la figura 16 se muestran las curvas B-H tomando con entrada un campo de 5.000 A-v/m (mayor al del caso base estudiado anteriormente) y un campo de 1.000 A-v/m (menor al del caso base estudiado anteriormente). En la figura se aprecian claramente los efectos de la saturación del material magnético.

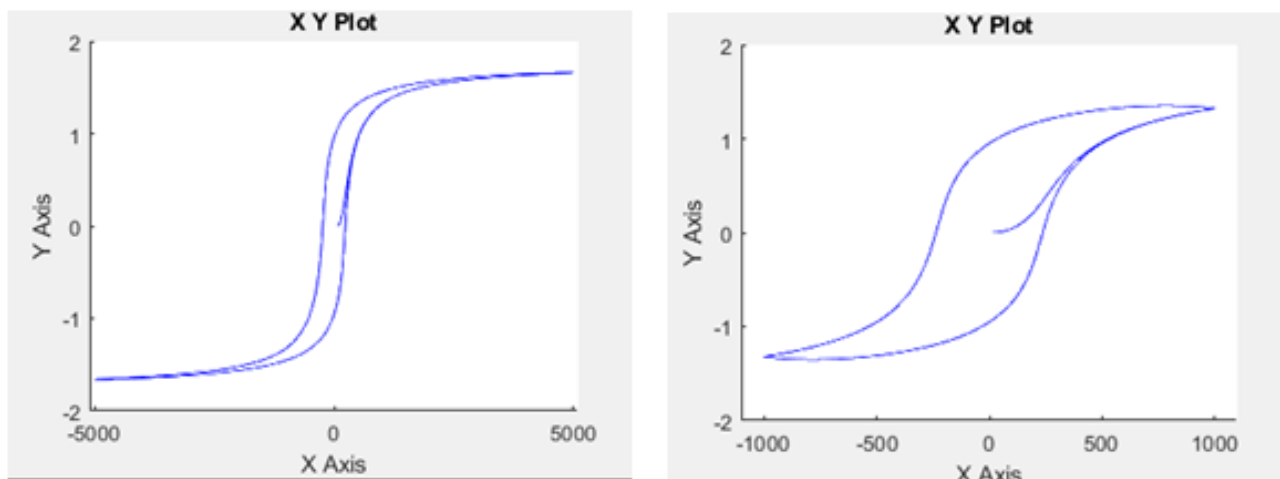


FIG. 16 LAZOS DE HISTÉRESIS PARA CAMPOS MAGNÉTICOS DE 5000 Y 1000 A-v/m

Cuanto mayor es el valor de cresta del campo magnético H más saturado está el material magnético, tal y como se aprecia en la siguiente figura que muestra la forma de onda de la inducción para dichos casos:

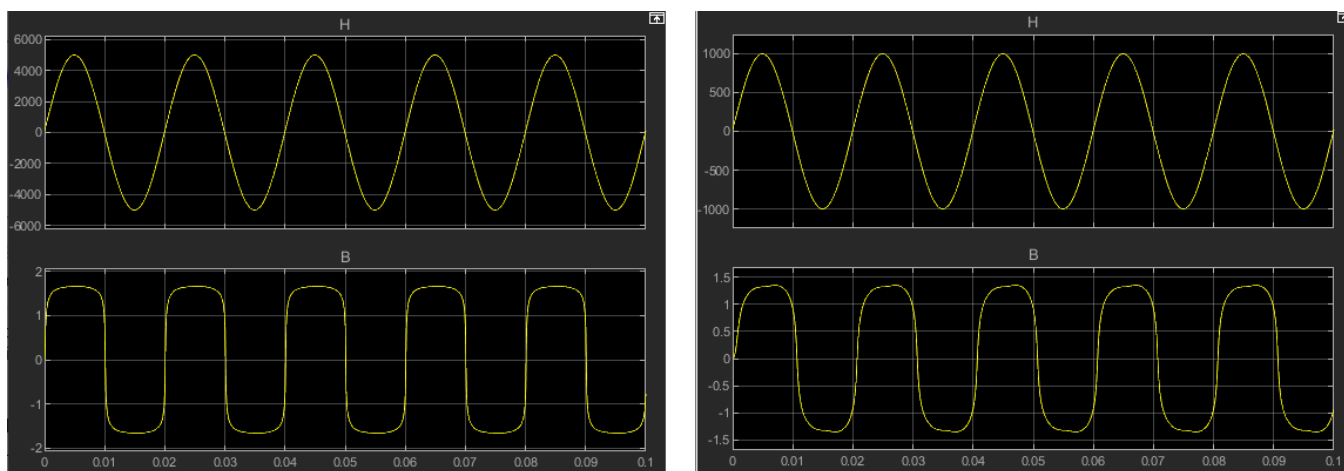


FIG. 17 FORMAS DE ONDA DE CAMPO MAGNÉTICO E INDUCCIÓN MAGNÉTICA PARA 5000 A-v/m Y 1000 A-v/m

Como se observa, la pendiente de la onda de inducción aumenta de manera muy brusca para el caso de tener 5000 A-v/m de campo, por el contrario, en el caso de 1000 A-v/m, la pendiente es algo más suavizada. Este fenómeno indica cuán saturado está el material para ese campo magnético aplicado.

5.1.3 Simulación de lazos menores de histéresis

En un material ferromagnético, además del lazo principal de histéresis pueden existir lazos menores. Estos lazos, son provocados por la existencia de máximos y mínimos relativos generados comúnmente por armónicos en la onda de campo magnético (provocados por la corriente que lo genera). Para mostrar la existencia de dichos lazos menores se realizarán simulaciones con ondas de campo distorsionadas, ya que, en función de la magnitud máxima de esos lazos menores, la curva de magnetización sufre variaciones y caracterizará la saturación del material.

Antes de presentar el modelo, es importante recordar que un armónico de onda es una frecuencia proporcional a la frecuencia principal. Frecuentemente a medida que aumenta el orden de un armónico, disminuye la amplitud de la onda del armónico.

Como se muestra en la figura 18 el modelo para el estudio frente armónicos de un material ferromagnético, se simulará utilizando como variable de entrada al modelo de la figura 10 un campo magnético H obtenido como suma de varias ondas sinusoidales con diferentes frecuencias y amplitudes, cuyos parámetros son facilitados en la Tabla 3. Con ello la forma de onda del campo e inducción magnética son no sinusoidal (Fig. 18).

Tabla 3 Amplitud y frecuencia angular del estudio de armónicos

	Onda fundamental	Onda de 5º armónico
Amplitud (A-v/m)	2000	800
Frecuencia (rad/s)	100π	500π

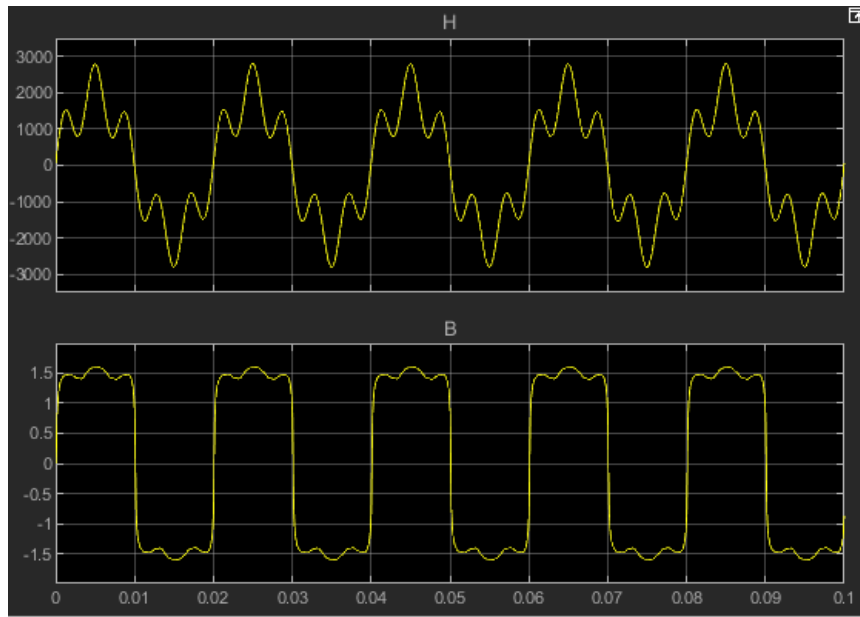


FIG. 18 FORMA DE ONDA DE CAMPO MAGNÉTICO E INDUCCIÓN MAGNÉTICA CON ARMÓNICO FUNDAMENTAL Y 5º ARMÓNICO

Tal como se ha comentado, la forma de onda del campo magnético obtenida es el resultado de sumar el armónico fundamental y el 5º armónico, donde se observa que, el resultado de la suma, posee los máximos y mínimos comentados anteriormente. Este tipo de onda, será la utilizada como entrada para el modelo J-A con el que se simularán los lazos internos de un material ferromagnético con las características enunciadas en la Tabla 1. En cuanto a la forma de onda de la inducción, se observa el aumento prácticamente vertical de la pendiente, debido a la saturación que supone en el material, el valor de campo magnético aplicado. Dicho modelo se observa en la Fig. 19, el cual es estructuralmente idéntico al principal (Fig. 10) con la salvedad comentada de la forma de onda del campo magnético en la entrada principal del modelo.

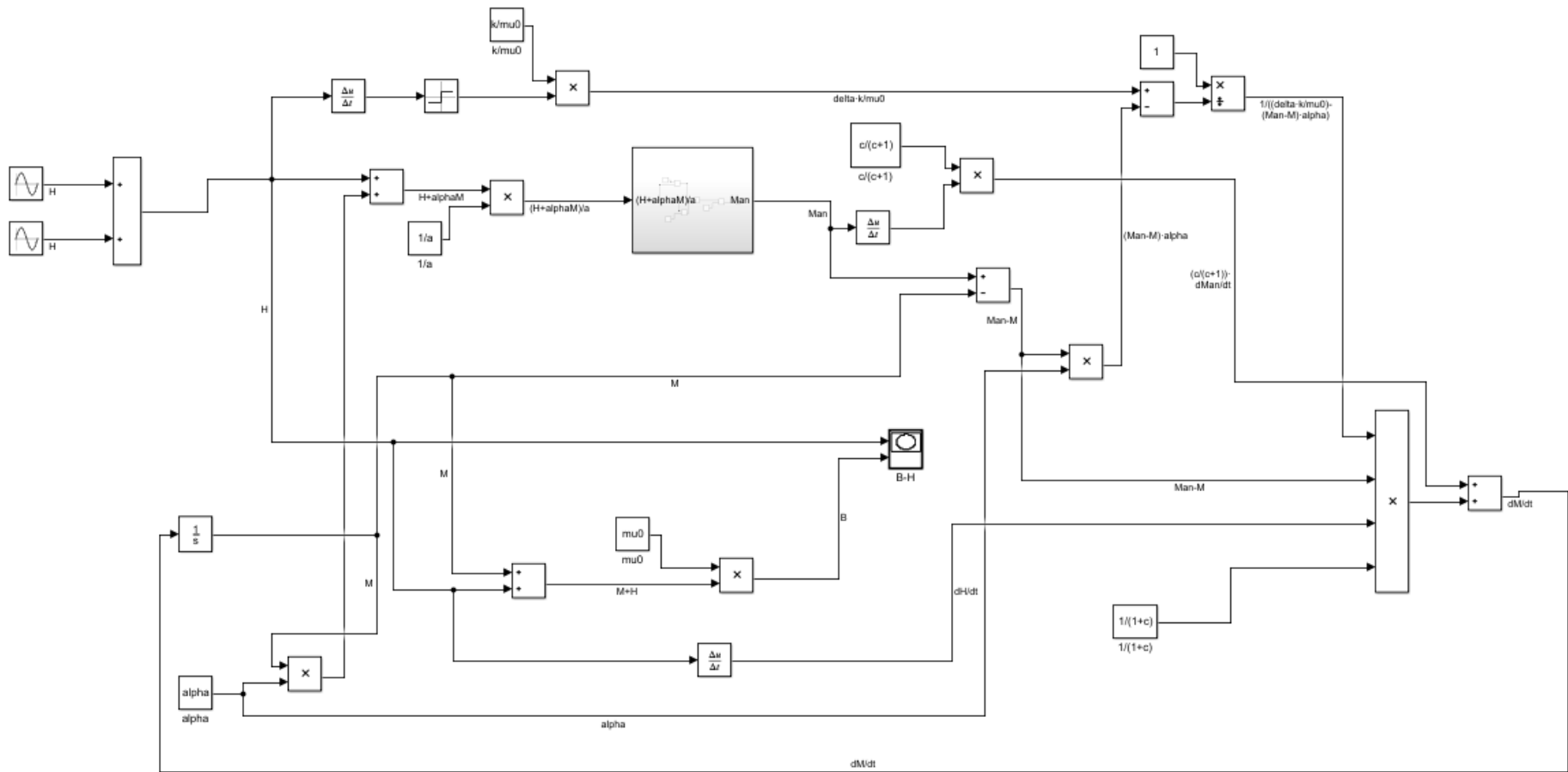


FIG. 19 MODELO J-A PARA SIMULAR ARMÓNICOS

El modelo que se describe en este apartado, arroja los resultados que se muestran en la siguiente figura:

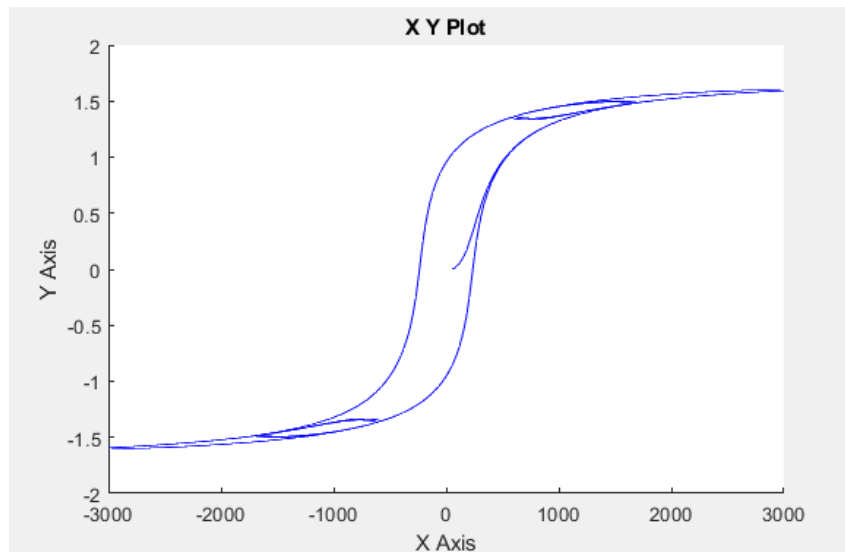


FIG. 20 CURVA DE HISTÉRESIS FUNDAMENTAL Y LAZOS MENORES

La Fig. 20 representa un ciclo de histéresis con lazos menores, cuyo estudio es necesario para ver la variabilidad que sufre tanto el campo magnético como la inducción en un material ferromagnético, mediante lo cual, se determinará la curva de magnetización que caracteriza al material.

A continuación se analizará la influencia de los armónicos pares en la onda de campo magnético. En base a lo mencionado en apartados anteriores, el campo magnético puede tener tanto distintos valores como formas de ondas, así como la influencia de más armónicos, en cuyo caso, la curva B-H puede presentar diferentes lazos menores, tal como se observa en la siguiente figura, en la que se incluye, además del 5º armónico comentado, la influencia de un 2º armónico con una amplitud de campo de 600 A-v/m y frecuencia angular de $200\pi \text{ rad/s}$. La inclusión de un 2º armónico hace que la onda de campo no sea simétrica, tal como muestra la siguiente figura junto al ciclo de histéresis correspondiente:

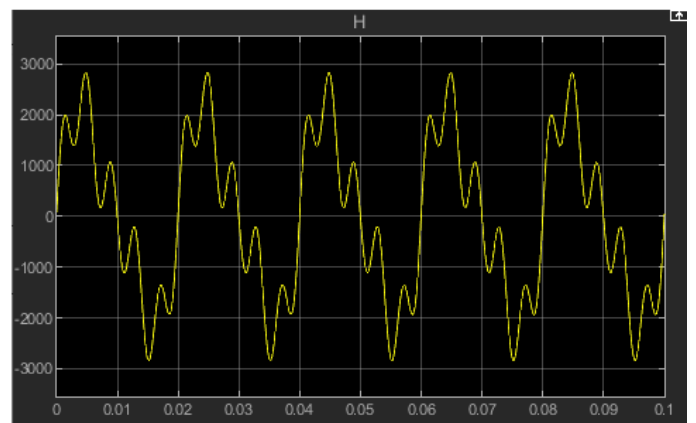
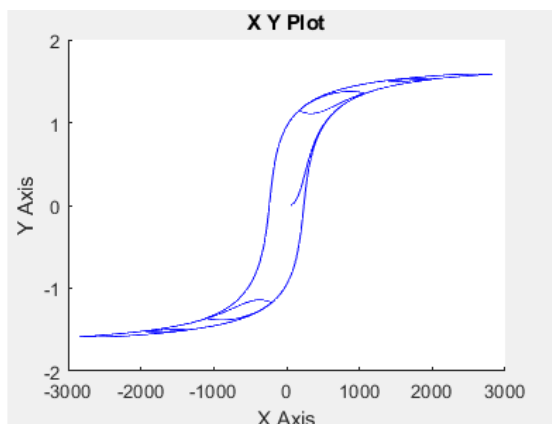


FIG. 21 CICLO DE HISTÉRESIS CON INFLUENCIA DE ARMÓNICOS PROPUESTOS Y CAMPO MAGNÉTICO QUE LO GENERA

5.2 Modelo Jiles-Atherton de un transformador de intensidad

Debido a que el núcleo magnético de un T.I. dispone de un material ferromagnético, se puede simular, el funcionamiento de este, acoplando el modelo J-A desarrollado anteriormente. Para ello, a partir de las corrientes primaria y secundaria del T.I, se obtiene el campo magnético que será utilizado como entrada en el modelo J-A testado en el apartado anterior, obteniendo de esta manera la curva de histéresis del núcleo, a partir de la que se puede hallar la inducción magnética y con ella la f.e.m. secundaria y finalmente la intensidad secundaria que se realimentará como entrada al modelo. Esta corriente es la variable de salida del modelo que será la que alimente al relé, contador, etc. al que se conecte el transformador de intensidad.

Las características del T.I. a modelar son las siguientes:

- Marca y tipo: Artech (ACD-24)
- Intensidad primaria asignada: 10 A
- Intensidad secundaria asignada: 5 A
- Potencia de precisión (potencia nominal) y factor de potencia: 10 VA, fdp 0,8.
- Tipo de transformador: Protección
- Clase de precisión y factor límite de precisión: 5P10

5.2.1 Parámetros de entrada

Para esta simulación se han tomado los parámetros de entrada de la Tabla 4 [5] por aproximarse más a las características del material magnético de nuestro T.I.

Tabla 4 Parámetros núcleo ferromagnético para T.I. [5]

PARÁMETRO	VALOR
M_s	$379,9 \cdot 10^3$
a	29,904
α	$1,119 \cdot 10^{-6}$
c	0,9369
μ_0	$1,26 \cdot 10^{-6}$
K	$1,267 \cdot 10^{-5}$

Por lo que se refiere a los datos del T.I., se han obtenido a partir de ensayos con una maleta de medida Omicron CT-Analyzer. Estos datos se muestran en la Tabla 5. Los números de espiras de los arrollamientos y las dimensiones del núcleo magnético se han estimado, ya que el T.I. modelado está encapsulado en resina y no es posible medir las dimensiones del circuito magnético prescindiendo de la resina.

Tabla 5 Parámetros internos del T.I.

PARÁMETRO	VALOR
$N_P: N_S$	10:5
R_s	0,0001 Ω
R_c	0
L_s	0,000164 H
L_c	0,000891 H
L_{Fe}	0,4 m
S_{Fe}	$55 \cdot 10^{-3} m^2$

Debido a que los parámetros presentados en la Tabla 5 han sido obtenidos en ensayos de laboratorio para un transformador concreto, los valores pueden variar en función del T.I. con el que se haga el estudio.

Dado que la intensidad primaria referida al secundario del transformador es de 10 A y debido a que este transformador es un equipo que se utilizará para su uso en protección con un factor límite de precisión de 10, en las simulaciones se ha considerado que las corrientes primarias referidas al secundario pueden estar comprendidas entre 1 y 100 A por las características físicas del núcleo magnético propuesto.

5.2.2 Simulación principal

Para el caso estudiado, se utilizará el modelo de la Fig. 12, cuya entrada será una corriente primaria sinusoidal con amplitud de 10 A y un período de 20 ms. Al ser la corriente primaria referida al secundario igual a la nominal, estas condiciones representan el funcionamiento del circuito al que está conectado el TI sin falta (esto es, en funcionamiento normal).

En la figura 21 se muestran los amperios-vuelta primarios del transformador (producto de la corriente primaria por el número de espiras primario).

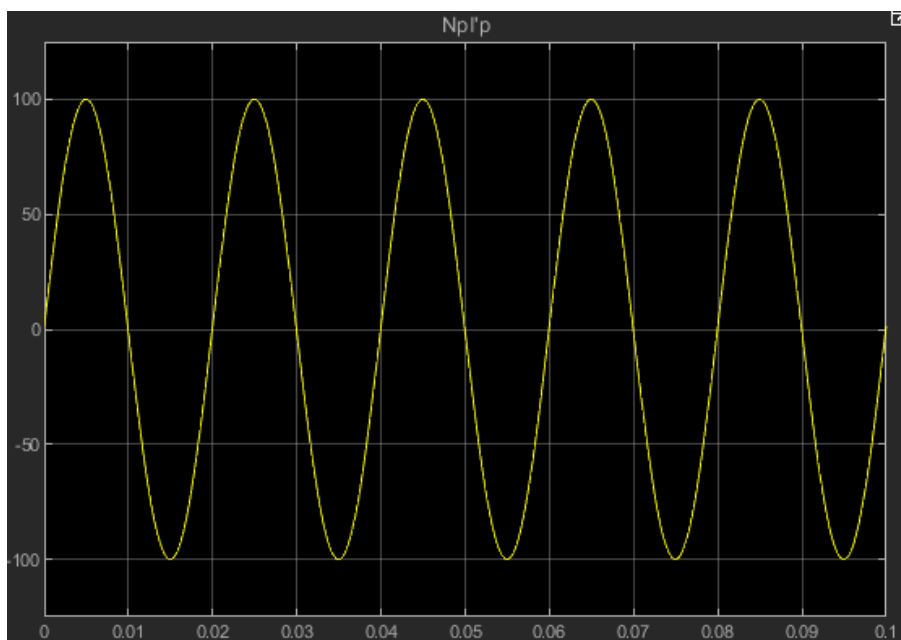


FIG. 22 ENTRADA DE INTENSIDAD MULTIPLICADA POR EL NÚMERO DE ESPIRAS EN EL DEVANADO PRIMARIO

La intensidad de magnetización se obtiene a partir de las intensidades primaria, referida al secundario, y secundaria del transformador, mediante un lazo cerrado, tal como indican las ecuaciones expuestas en el apartado 4.2 y el modelo de la Fig.12. Una vez obtenida la corriente magnetizante, se puede hallar el campo magnético que alimentará el núcleo ferromagnético propuesto, tomando dicha corriente y dividiéndola entre la longitud del hierro del T.I. obteniendo una forma de onda tal que:

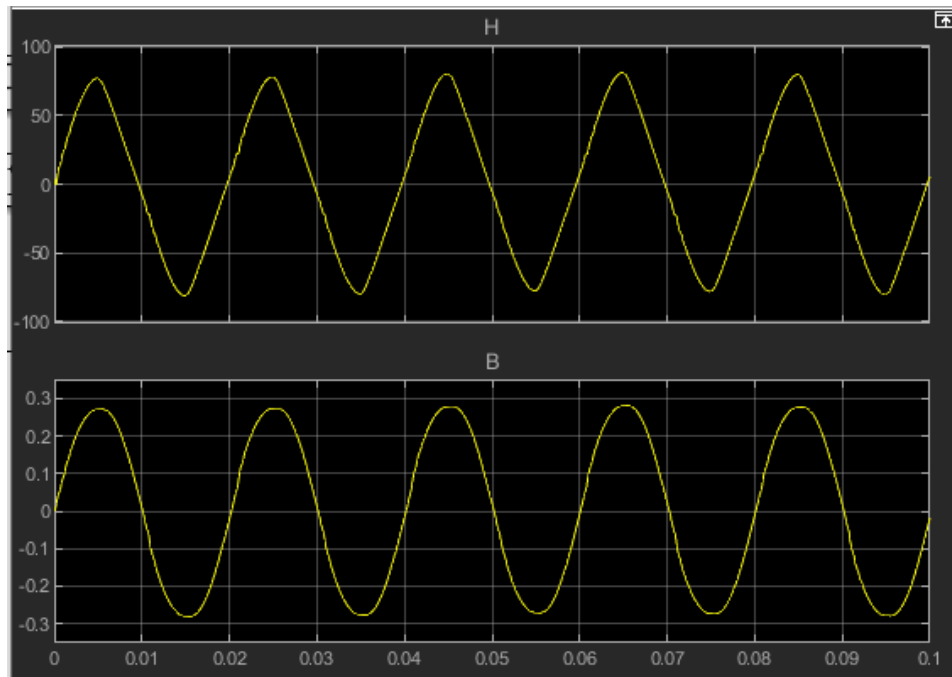


FIG. 23 FORMA DE ONDA DE CAMPO E INDUCCIÓN MAGNÉTICA EN EL NÚCLEO FERROMAGNÉTICO

Este campo magnético obtenido, es a partir del que, mediante la inducción en el núcleo, se engendra una f.e.m. mediante el flujo que se provoca en el mismo. Además, este campo magnético, será la entrada para el modelo J-A con el objetivo de obtener el lazo de histéresis del núcleo magnético tal como se muestra a continuación en la Fig. 24:

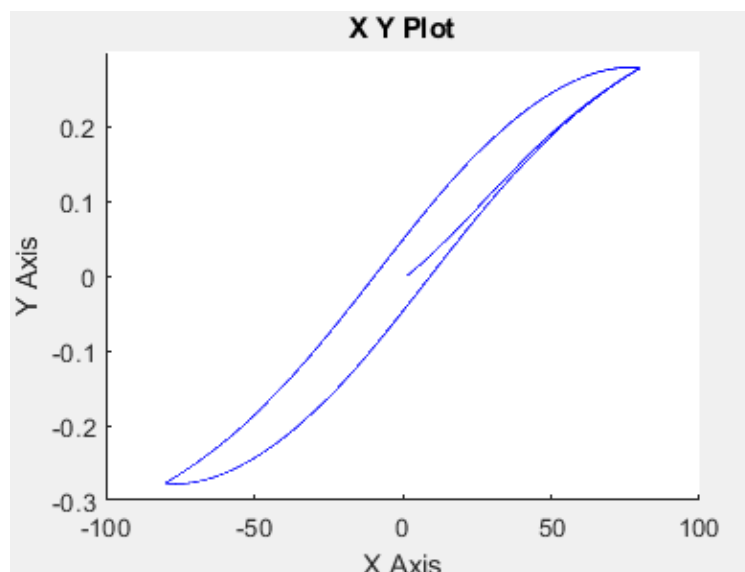


FIG. 24 CURVA DE MAGNETIZACIÓN DEL T.I.

Como se observa en la figura 24, con la intensidad que se inyecta en el modelo, el material magnético no está saturado. Este hecho también se aprecia en la figura 23, en donde la inducción tiene una pendiente muy suave siendo prácticamente una senoide pura.

Con los resultados obtenidos del modelo J-A acoplado al T.I., se puede obtener la intensidad secundaria en el transformador., tal como se ha enunciado en el apartado 4.2. y en párrafos anteriores. La forma de onda de esta intensidad secundaria es la mostrada en la siguiente figura:

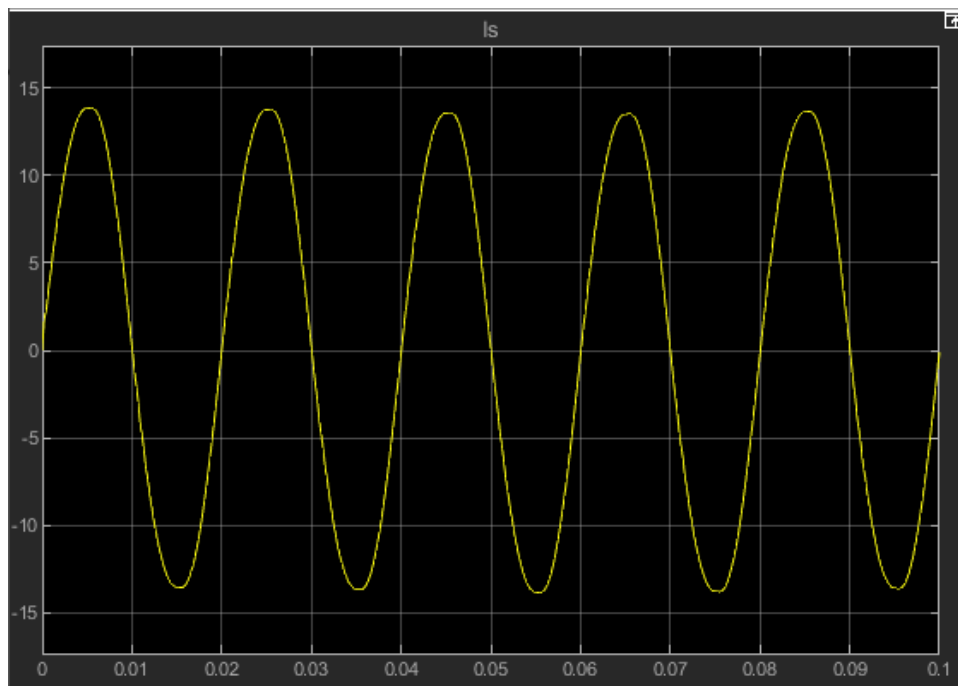


FIG. 25 INTENSIDAD SECUNDARIA

Tal como se aprecia, la forma de onda en el secundario es sinusoidal y será la que alimente al equipo de protección al que se conecta.

5.2.3 Ensayo del transformador de intensidad ante cortocircuito en la red

Como ya se ha explicado, los T.I. se utilizan como utensilios de medida y/o protección en el sistema eléctrico, por ello, se debe estudiar el funcionamiento de estos equipos ante la posibilidad de cortocircuitos.

Para simular dicho fenómeno, se realizará un ensayo en el modelo planteado en la Fig. 12 mediante inclusión de ondas que simulen el transitorio de cortocircuito.

El comportamiento de un cortocircuito se basa en el aumento repentino de la onda de corriente para después, tras la actuación de las protecciones, disminuir su amplitud siguiendo una exponencial inversa. Utilizando esta aportación, se puede simular un cortocircuito a partir de un bloque de exponencial, cuya entrada será la inversa del tiempo ($1/t$), dicho sistema simulará la componente exponencial en el tiempo. Una vez se tenga modelada la componente exponencial, se podrá simular el transitorio de cortocircuito como producto de la dicha componente exponencial por una onda cuyo valor de amplitud determinará el valor de pico de la intensidad de cortocircuito. Dicha explicación, se puede apreciar más evidente en la Fig. 27 que ilustrará el modelo utilizado para este ensayo.

El instante de cortocircuito se modelará mediante la utilización de un interruptor que conmutará entre la entrada de corriente base y la corriente de cortocircuito posterior. El objetivo de utilizar este interruptor, es ser capaces de simular la aparición de un cortocircuito en función de un instante dado.

La forma de onda que se utilizará para simular el cortocircuito tendrá la forma que se aprecia en la siguiente figura:

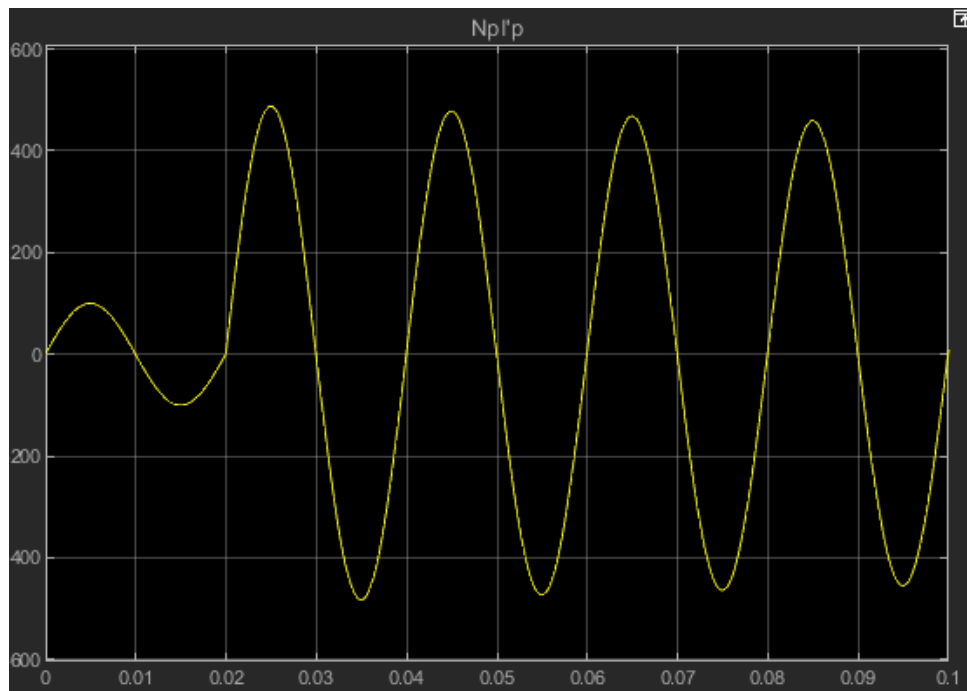


FIG. 26 INTENSIDAD DE ENTRADA POR LAS ESPIRAS DEL DEVANADO PRIMARIO EN ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Si se observa la figura, se visualiza, como la intensidad en régimen permanente, pasa de un valor de 10 A a 50 A de manera brusca, para luego, disminuir su amplitud de manera exponencial. Concretamente, este cortocircuito, se ha simulado para las amplitudes de corriente mencionadas, y que se dé tras 20 ms de simulación.

Una vez expuesta la entrada de corriente que se utilizará para la simulación de un ensayo de cortocircuito, el modelo implementado es el que se ve en la figura de a continuación:

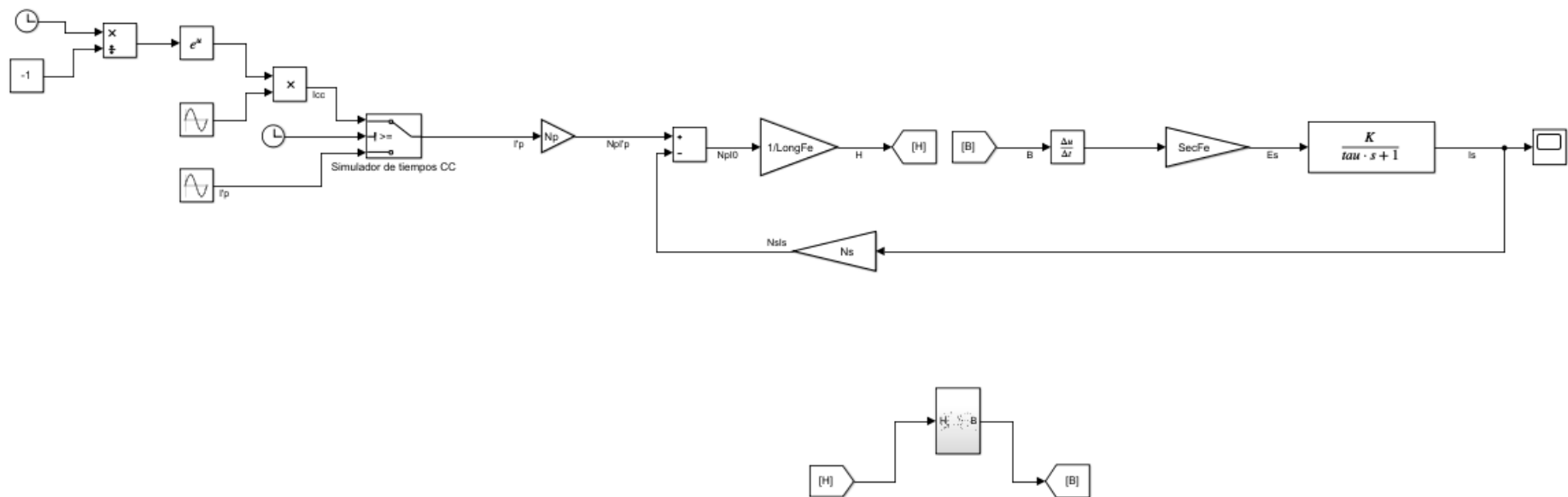


FIG. 27 MODELO DE T.I. PARA ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Los resultados obtenidos mediante el modelo planteado en la Fig. 26 se muestran en la figura siguiente

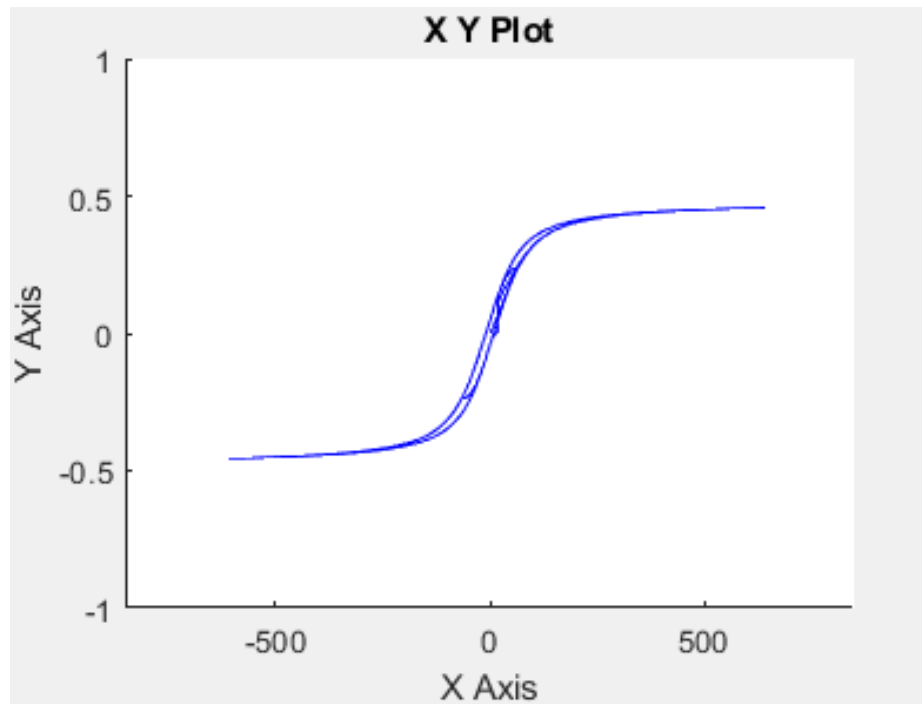


FIG. 28 LAZO DE HISTÉRESIS DE UN T.I. EN CORTOCIRCUITO

Debido a las características de la entrada de corriente, se aprecia como la curva de magnetización tiene una forma, dentro de la similitud aparente, diferente a las presentadas a lo largo de todo el documento. Esto es debido a que, debido al cortocircuito, el T.I. está saturado, lo que se traduce en peor precisión a la hora de tomar valores. Esto se ve cuando, si se observa con precisión, la curva, inicialmente, quiere iniciar el ciclo de histéresis normal, hasta que pasado un tiempo (20 ms), se produce el cortocircuito que genera un aumento súbito del campo magnético produciendo la forma del ciclo que se aprecia en la Fig. 28.

Respecto a la intensidad secundaria que va a tomarse como medidas en los equipos asociados al T.I., tiene la siguiente forma de onda:

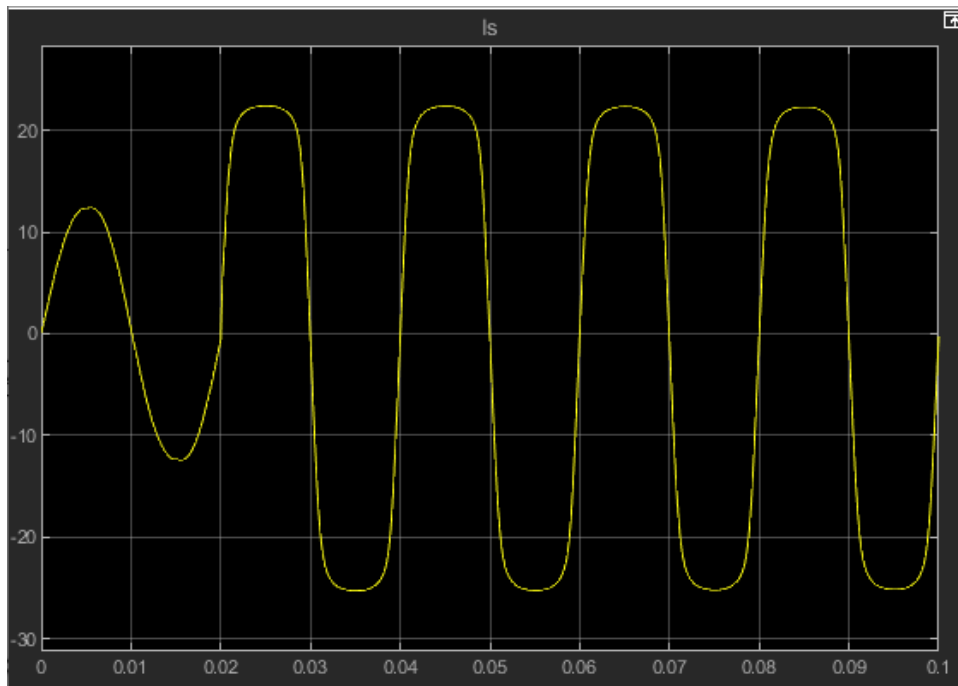


FIG. 29 INTENSIDAD SECUNDARIA PARA ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Como se visualiza en la figura, la intensidad secundaria se mantiene constante hasta el instante en el que se da el cortocircuito, momento en el cual, la intensidad sufre un aumento muy significativo en su valor, este hecho provoca la saturación del T.I, que, a efectos prácticos, se traduce en pérdidas por inducción en la rama magnetizante, lo que lleva a errores de precisión en el secundario, tal como se ha comentado con anterioridad.

5.3 Comparación con la bibliografía

A lo largo del trabajo, se han realizado búsquedas exhaustivas de información referida al modelo Jiles-Atherton de un material ferromagnético. Debido a ello, se han encontrado varios trabajos referidos al tema por lo que es interesante, realizar una comparativa entre el modelo propuesto y los modelos utilizados como referencia.

Tal y como se ha mencionado en apartados anteriores, se ha hecho hincapié en un artículo que trata sobre la identificación e implementación de parámetros en el modelo Jiles-Atherton [5]. Además de ello, se han utilizado referencias de otros trabajos, para realizar comparativa de parámetros a utilizar, así como apoyo para la implementación del modelo [6].

En base al objetivo que ocupa el presente capítulo, se va a realizar una comparativa con la fuente principal para la realización del trabajo en cuando a modelo J-A se refiere.

En el artículo [5] se trata la obtención de los parámetros de un material ferromagnético para después realizar un estudio a partir de un modelo propuesto. El modelo realizado en el presente trabajo, es básicamente el propuesto por los autores con diferencias en la implementación de las ecuaciones en Simulink®, así como en la entrada al modelo.

Para el modelo implementado a lo largo del trabajo se ha utilizado una entrada de campo magnético sinusoidal, mientras que en el propuesto por los autores del artículo [5] utilizan forma de onda triangular. A priori, las diferencias a la hora de simular el modelo

son mínimas, ya que el modelo básicamente utiliza los valores máximos de amplitud, a partir de los cuales obtiene la curva de histéresis.

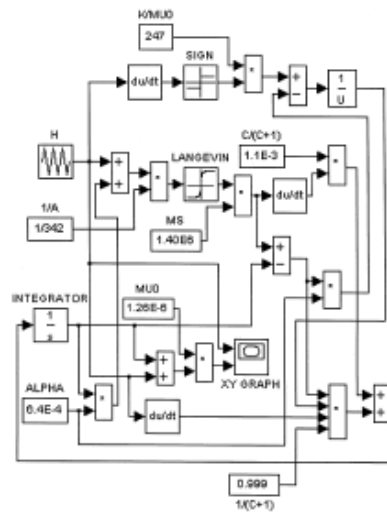


FIG. 30 DIAGRAMA DE BLOQUES EN SIMULINK® PARA GENERAR CURVAS DE HISTÉRESIS USANDO EL MODELO JILES-ATHERTON [5]

En cuanto a los parámetros propuestos a lo largo del trabajo, son los mismos que se presentan en la Tabla 2 del artículo [5]. Son parámetros para un núcleo magnético de acero con baja concentración de carbono. Se han utilizado estos, con el objetivo de fidelizar lo máximo posible el modelo propuesto ya que se tienen referencias de su funcionamiento. Antes de tomar la decisión de elegir estos parámetros se realizó una comparativa con el artículo [6], que propone modelar un T.I. mediante la herramienta ATPDraw (EMTP), en dicho artículo, en la Tabla 1 se proponen parámetros que simulan un T.I. con un núcleo magnético definido por dichos valores, pero se desecharon dichos valores, debido a que el modelo J-A de T.I. que se pretendía modelar en este Trabajo Fin de Grado difiere mucho de los datos tomados en mencionado artículo.

Antes de intentar modelar con los parámetros finalmente elegidos, se buscó información sobre núcleos magnéticos de T.I. reales, de donde se encontró que actualmente, se realizaban con materiales nanocristalinos. Tras encontrar esta información, se intentó implementar el modelo con valores referidos a este material, pero la poca información existente relativa a los datos concretos que se necesitan para el modelo presentado hizo que se realizara el modelo con los datos que se han propuesto a lo largo del documento.

6. CONCLUSIONES

6.1 Resumen

Este Trabajo Fin de Grado, acomete un modelado de un transformador de intensidad, mediante la teoría Jiles-Atherton de un material ferromagnético. Se ha desarrollado este modelo, con el fin de fidelizar lo máximo posible el funcionamiento de un T.I. de manera informática.

Con este trabajo, se pretende aportar, de una manera didáctica, al laboratorio de la asignatura de Protecciones Eléctricas, conceptos desarrollados en la carrera y en la asignatura en cuestión, con el fin de conocer el funcionamiento de un transformador de intensidad.

A lo largo del proyecto, se realiza un repaso genérico de toda la teoría referida a transformadores de intensidad, empezando por la misión para la que están diseñados estos equipos, continuando por explicar la diferencia entre transformadores de medida y transformadores de protección, para acabar con los fenómenos que se han de tener en cuenta para diseñar y modelar un T.I. Además de todo ello, se ha tomado un capítulo para explicar la herramienta utilizada para llevar a cabo el modelo propuesto, en donde se describe la herramienta Simulink®, así como los parámetros que se han tenido que configurar para desarrollar el modelo de este trabajo.

Para el modelado del transformador de intensidad, se han tenido en cuenta tanto fundamentos de electromagnetismo, tales como la ley de Ampere, o las leyes de Maxwell, como fundamentos de electricidad para analizar el circuito que caracteriza el T.I., como pueden ser leyes de Kirchhoff o la ley de Ohm. A parte de todo ello, se ha debido dimensionar el equipo en base a resultados obtenidos en ensayos previos y experiencia anterior de D. Juan Carlos Burgos Díaz con este tipo de equipos.

Además de todo lo descrito, se han llevado a cabo ensayos para cada modelo desarrollado. En su caso, para el modelo de materiales ferromagnéticos de Jiles-Atherton, se ha realizado un estudio de armónicos, para tratar su funcionamiento ante este fenómeno. Respecto al T.I., una vez se ha acoplado el modelo J-A, se ha realizado a parte de su simulación principal, un ensayo de cortocircuito en la red a la que se conecta, para simular, de la manera más exacta posible, un comportamiento real ante este tipo de contingencias, en donde una parte fundamental, es el estudio de la saturación del núcleo magnético del T.I.

6.2 Conclusiones

El modelo propuesto a lo largo de todo el trabajo, pretende servir como guía para la implementación de los transformadores de intensidad en el laboratorio de protecciones eléctricas para alimentar relés diferenciales de protección. En base a ello, se ha conseguido implementar un modelo de T.I. que contemple las funcionalidades del equipo en función de contingencias reales.

Como primero se implementó el modelo J-A, se propuso realizar el dimensionado con una entrada triangular modelada a partir de fuentes de pulsos utilizando un integrador para obtener la onda objetivo en ese momento. Tras ello, como la entrada de campo magnético en el modelo J-A cuando estuviera acoplado al T.I. sería sinusoidal (o eso se buscaba), se tuvo que realizar una simulación del modelo de J-A, tal como está presentado en el documento. Las curvas de histéresis obtenidas en uno y otro modelo,

son exactamente las mismas, ya que a pesar de que el sistema analiza el transitorio, los valores que dan forma a la inducción en el material son los valores de cresta. Por todo ello, la forma de onda, dentro de un margen relativamente normal en el mundo de la electricidad, no influye en la forma del lazo de histéresis.

También se ha realizado un estudio de armónicos para el modelo J-A, con el fin de simular, tal y como se explica en el capítulo correspondiente, lazos menores de histéresis. Esto se ha conseguido mediante suma de diferentes armónicos de onda, buscando la complejidad en la misma, para simular la mayor cantidad de lazos internos. Se puede buscar la saturación máxima del material implementando tantos armónicos como se desee, pero ello conlleva a un resultado a veces absurdo sin ningún significado físico.

En lo referente al modelo de transformador de intensidad, tras plantear las ecuaciones que modelarían, en régimen transitorio, el equipo, se acopló el modelo J-A para realizar la simulación completa del T.I. con un núcleo magnético “real”. Una vez se comprobó que funcionaba, se realizó una optimización del modelo J-A, con datos que se aproximaban más al material de un núcleo magnético de un T.I., para llevar a cabo una simulación lo más fiel posible al equipo del que dispone la Universidad Carlos III de Madrid. En esta primera simulación del T.I., se buscó hasta qué punto el núcleo del mismo sería funcional. Para ello, se aumentaron los valores de corriente primaria referida al secundario hasta llegar a un límite en el que el núcleo se encontraba saturado. Se sabe que existe una saturación en base a los resultados obtenidos porque la curva de inducción posee una pendiente muy pronunciada (casi vertical) y en su valor máximo se observa prácticamente una constante a lo largo del semiperiodo. Otro indicativo de que el núcleo magnético está saturado es que el lazo de histéresis, a pesar de tener un campo magnético de gran valor, la inducción aumenta muy poco, eso explica que el material no puede inducir más flujo en el núcleo.

Tras realizar la simulación principal, se pretendió hacer un estudio que simulase cortocircuitos en la red, lo cual resultó satisfactorio en base al objetivo que se tenía en esta simulación, que no es otro que ver el funcionamiento del T.I. en estas circunstancias. Tal y como se aprecia en el documento, la curva de histéresis presenta una saturación bastante elevada debido principalmente a la alta corriente entrante en el modelo, la cual provoca un alto campo magnético que a su vez genera una inducción alta, de modo que la inducción prácticamente no aumenta a partir de cierto punto.

6.3 Sugerencias y recomendaciones para trabajos futuros

Tal y como se ha explicado en la introducción de este Trabajo Fin de Grado, se pretendía llevar a cabo este estudio mediante el software ATPDraw, pero debido a la inexistencia de licencias completas en el momento de iniciar el trabajo, se decidió realizar el proyecto en Simulink®. Actualmente, la Universidad Carlos III de Madrid, ya posee una licencia de este tipo, por ello se sugiere realizar el proyecto en dicho software para una buena comprensión del mismo, y que sirva como comparativa para el presente proyecto.

Una propuesta interesante relacionada con esta parte del trabajo para el laboratorio de Protecciones Eléctricas, sería intentar modelar el T.I. propuesto o bien por Simulink® o bien por el software ATPDraw en las aulas informáticas. Con ello, el alumno comprenderá fundamentos que debe conocer referentes a este tipo de equipos. Además, como complemento a esta propuesta, se puede realizar un modelado de un

transformador de tensión realizando un estudio similar al presente como un nuevo Trabajo Fin de Grado.

Referente al presente trabajo, se propone realizar un modelo que sea capaz de simular armónicos en la red pero que afecten al conjunto del transformador de intensidad. A pesar de que no es común la existencia de armónicos en la red, es atrayente el ver cómo funciona el modelo de T.I. ante dicha contingencia con el fin de estudiar su saturación, si la hubiera, así como si se producen o no, lazos menores de histéresis.

Con el fin de optimizar aún más este trabajo, sería interesante realizar un estudio de lazos de histéresis del núcleo del T.I. existente en la Universidad Carlos III de Madrid, con el fin de poder simular el núcleo real en el modelo implementado, así como cerciorarse de los datos supuestos por el enclaustramiento del T.I.

Si se quiere llevar a cabo el estudio de un T.I. distinto al que se ha desarrollado en el este trabajo, se recomienda que se haga un estudio del equipo, previa implementación del modelo.

7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Berrosteguieta y A. Enzunza, "Teoría y tecnología de los transformadores de medida", Artech, España, Artículo técnico ARTECHE_CF_TeoriaTM_ES, 2018. [En línea]. Disponible en:
https://www.artech.com/de/cmis/browser?id=workspace://SpacesStore/e352ca80-aaab-43cd-93dc-c81db4d6d438&entity_id=3527
- [2] J. Castellanos. "Magnetismo". John Mei (Magnetismo).
<http://jjcastellanos62.blogspot.com/2012/09/magnetismo.html> (acceso: 20 de febrero de 2019)
- [3] Autor desconocido. "Dominio magnético". Wikipedia.
https://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_magn%C3%A9tico (acceso: 20 de febrero de 2019)
- [4] Autor desconocido. "Capítulo VII.-Magnetismo". Lecciones de electrónica
<http://www.ifent.org/lecciones/cap07/cap07-06.asp> (acceso: 20 de febrero de 2019)
- [5] E. Del Moral Hernández, C. S. Murunaka y J.R. Cardoso, "Identification of the Jiles-Atherton model parameters using random and deterministic searches", *Physica B*, nº 275, pp. 212-215, 2000.
- [6] S. T. Liu, S. R. Huang y H. W. Chen, "Using TACS Functions Within EMTP to Set Up Current-Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferrromagnetic Hystereis", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22, Nº 4, Octubre 2007.
- [7] Juan Carlos Burgos Díaz, "Tema 1. Repaso de conceptos básicos de electricidad y magnetismo", en *Apuntes de Circuitos Magnéticos y Transformadores UC3M*, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/circuitos-magneticos-y-transformadores/temas/TEMA-1.pdf/view>
- [8] J. P. Barzallo Paidá, "Modelo matemático de un transformador real monofásico de dos devanados", Trabajo Fin de Carrera, Dpto. Ingeniería eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2015. [En línea]. Disponible en:
<https://docplayer.es/10702027-Universidad-politecnica-salesiana-sede-guayaquil-facultad-de-ingenieria-carrera-ingenieria-electrica-tesis-previa-a-la-obtencion-del-titulo-de.html>
- [9] Autor desconocido. "Armónico". Wikipedia.
<https://es.wikipedia.org/wiki/Arm%C3%B3nico> (acceso: abril de 2019)
- [10] Siemens. "Transformadores de protección y medida 4M", Siemens, España, Artículo técnico, HG 24, 2009 [En línea]. Disponible en:
https://w3.siemens.com/powerdistribution/global/SiteCollectionDocuments/en/mv/indoor-devices/protective-measuring-transformers-m4/catalogue-protective-and-measuring-transformers-m4_es.pdf

8. PRESUPUESTO E IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO

8.1 Presupuesto

Tabla 6: Presupuesto de elaboración del proyecto

CAPÍTULO 1: INGENIERÍA			
CATEGORÍA	HORAS	€/HORAS	TOTAL €
Tutor ingeniería eléctrica UC3M	30,00	33,00	990,00 €
Ingeniero eléctrico junior	250,00	9,00	2.250,00 €
SUBTOTAL INGENIERÍA			3.240,00 €
CAPÍTULO 2: SOFTWARE UTILIZADO			
SOFTWARE	HORAS	€/HORAS	TOTAL €
Paquete Microsoft Office 2016	120,00	0,0014623	0,18 €
Matlab and Simulink Student Site	120,00	0,0009846	0,12 €
Paquete Adobe Acrobat XI Pro	10,00	0,0022824	0,02 €
<i>Nota: para este capítulo, se ha considerado una vida útil del software de 8 años</i>			
SUBTOTAL SOFTWARE			0,32 €
CAPÍTULO 3: MATERIAL UTILIZADO			
HARDWARE	MESES	€/MESES	TOTAL €
Ordenador Lenovo Ideapad 300	4,00	8,334	33,34 €
<i>Nota: para este capítulo, se ha considerado una vida útil del hardware de 8 años</i>			
SUBTOTAL MATERIAL			33,34 €
TOTAL			3.273,65 €

8.2 Impacto socio-económico

El proyecto redactado está realizado para mostrar de una manera sencilla el proceso para modelar un transformador de intensidad. Por ello, puede utilizarse tanto para diseñar y crear un transformador de intensidad a nivel industrial, como para ser una aportación en estudios superiores enfocados a la Ingeniería Eléctrica utilizándose como herramienta de simulación para el estudio de contingencias reales. Así pues, este trabajo ahorrará una inversión en investigación para el modelado del T.I., implicando, únicamente, un trabajo de ensayos en el laboratorio para obtener datos del núcleo magnético del T.I. pertinente.

Además, como se ha comentado en la introducción y a lo largo del documento, concretamente, se pretende aportar en la asignatura de Protecciones Eléctricas de la Universidad Carlos III de Madrid conceptos aclaratorios para la comprensión del funcionamiento de un T.I. como complemento a lo que se cursa, utilizándose como guía del laboratorio de la asignatura.

Como conclusión de este apartado, se puede decir que el proyecto sirve como ayuda y guía para la implementación del modelo de un transformador de intensidad y poder simular así su funcionamiento.